

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Лекция 21. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ТЕРМОЯДЕРНОМ СИНТЕЗЕ

Из четырёх основных источников ядерной энергии в настоящее время удалось довести до промышленной реализации только два: энергия радиоактивного распада утилизируется в источниках тока, а цепная реакция деления – в атомных реакторах. Третий (наиболее мощный) источник ядерной энергии – аннигиляция элементарных частиц пока не вышел из области фантастики. Четвертый же источник – **управляемый термоядерный синтез, УТС**, находится на повестке дня. Этот источник по своему потенциалу хотя и меньше третьего, но существенно превышает второй. Надежды на УТС связаны с двумя обстоятельствами: согласно современным представлениям звезды (в том числе наше Солнце) существует за счет стационарной термоядерной реакции, и неконтролируемый термоядерный процесс удалось довольно просто реализовать во взрыве водородной бомбы. Кажется, нет никаких принципиальных препятствий для поддержания управляемой реакции ядерного синтеза и на Земле. Однако, интенсивные попытки реализовать в лабораторных условиях УТС окончились полным провалом. Более того, оптимистические заявки некоторых ученых и инженеров, что термоядерный синтез будет поставлен на службу энергетики в 21-м веке, кажутся ничем не обоснованными.

Другое дело – неуправляемый термоядерный синтез – его удалось реализовать в земных условиях. Водородные бомбы созданы и успешно испытаны ещё в середине прошлого века.

В данной лекции мы рассмотрим особенности реакций термоядерного синтеза, существующие и проектируемые установки реализации управляемого синтеза и перспективы подобных установок для создания нового направления энергетики. Военному применению термоядерных реакций также уделим определённое внимание.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В одной из предыдущих лекций, мы уже разбирали реакции ядерного синтеза и показали, что при достаточно больших энергиях, реализуемых на мощных ускорителях, практически любые нуклиды, даже самые тяжёлые, можно вовлечь в реакции синтеза. Другое дело, что затраты энергии здесь будут значительно превышать энергетический выигрыш. Поскольку нас сейчас будут интересовать способы получения энергии при реакциях синтеза, то под термоядерным синтезом мы будем понимать исключительно реакции взаимодействия лёгких элементов: изотопов водорода, гелия и лития.

Термоядерные реакции – реакции слияния (синтеза) лёгких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при очень высоких температурах (порядка десятков миллионов градусов и выше).

Ядерный синтез, термоядерный синтез - реакция слияния лёгких атомных ядер в более тяжелые ядра, происходящая при сверхвысокой температуре и сопровождающаяся выделением огромных количеств энергии. Ядерный синтез – это реакция, обратная делению атомов: в последней энергия выделяется за счёт расщепления тяжелых ядер на более лёгкие.

1.1 Термодинамика ядерного синтеза

То, что ядерные реакции синтеза могут давать высокий энергетический выигрыш понятно не только из астрономических данных. Достаточно взглянуть на график зависимости энергии связи от массового числа, A . График имеет максимум при $A \approx 60$. Очевидно, что выделением энергии будут сопровождаться реакции синтеза лёгких ядер и реакции деления тяжелых ядер. Причем характер графика показывает, что синтез может дать немного больший энергетический выход, чем реакция деления.

Простейшее ядро - ядро атома водорода, состоит из одного протона. Энергию, которая заключена в этом ядре, легко подсчитать по формуле Эйнштейна $E=mc^2$. Масса протона $m_p=1,76 \cdot 10^{-27}$ кг, скорость света $c=3 \cdot 10^8$ м/с. Отсюда получаем $E=1,5 \cdot 10^{-10}$ Дж или 938 МэВ. Это очень большая энергия. При нормальных условиях в одном кубическом метре водорода содержится $5,4 \cdot 10^{25}$ протонов, так что полная энергия, которую содержит 1 м³ водорода равна $8,1 \cdot 10^{15}$ Дж или $2,25 \cdot 10^9$ кВт*ч. Это число можно сравнить разве что с выработкой электроэнергии в нашей стране за день. К сожалению, полностью извлечь энергию, содержащуюся в атомных ядрах, можно только одним способом - соединив их с ядрами из антиматерии. При столкновении протона p с антипротоном \bar{p} происходит их взаимоуничтожение, а выделяемая при этом

энергия полностью переходит в энергию γ -квантов: $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$. Гамма-кванты можно поглотить в толстом слое вещества и выделившееся тепло использовать для производства электроэнергии. Увы! У нас нет больших количеств антипротонов. Придется пока подождать с практической реализацией данного способа получения энергии.

Возможно выделение энергии в реакции слияния легких ядер: $M(Z_1, A_1) + M(Z_2, A_2) = M(Z, A) + \Delta E / c^2$. Для получения энергии методом ядерного синтеза пригодны любые ядра от водорода до железа. Обычно в реакциях синтеза образуется несколько ядер. В результате освобождается энергия в форме кинетической энергии продуктов синтеза.

Если бы удалось объединить тяжёлые изотопы водорода - тритий и дейтерий - в реакции ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$, то выделилось бы 17,6 МэВ энергии. Приращение массы покоя частиц, участвующих в реакции $\Delta Mc^2 = -\Delta E$, $\Delta E = 17,6$ МэВ. Около 80% выделяющейся энергии уносят нейтроны, а остальные - α -частицы с энергией 3,6 МэВ. При равных весовых количествах реагирующих веществ в реакции синтеза дейтерия и трития выделяется в четыре раза больше энергии, чем при делении ядра атома урана.

Трудности осуществления реакции синтеза процесса связаны с тем, что силы электростатического отталкивания между положительно заряженными ядрами препятствуют их сближению. Для сближения изотопов водорода на расстояние $r \sim 10^{-12}$ см необходимо затратить энергию $ke^2/r \sim 0,15$ МэВ, что существенно меньше энергии, получаемой в результате синтеза. Поэтому эта реакция энергетически выгодна, хотя провести ее не просто. В нормальных условиях кинетическая энергия ядер легких атомов слишком мала для того, чтобы, преодолев электростатическое отталкивание, они могли сблизиться и вступить в ядерную реакцию. Однако отталкивание можно преодолеть «грубой» силой, например, сталкивая ядра, обладающие высокой относительной скоростью.

Средняя энергия связи нуклона в ядре $E_{св}/A$ растёт с ростом от A до $A \approx 50 - 60$. Поэтому, когда образуется среднее или лёгкое ядро при слиянии более лёгких ядер, должна освобождаться энергия, поскольку в новом ядре нуклоны сильнее связаны, чем в исходных ядрах. Особенно велико должно быть выделение энергии при синтезе лёгких ядер, так как величина $E_{св}/A$ при малых A растёт очень быстро. Так, при образовании ядра гелия из ядер дейтерия и трития, выделяется энергия: $28,3 - (8,5 + 2,2) = 17,6$ МэВ. В расчёте на один нуклон, участвующий в реакции, получается $\frac{17,6}{5} \approx 3,5$ МэВ. Таким образом, при полном преобразовании 1 кг смеси дейтерия и трития в гелий выделяется в 4 раза больше энергии, чем при полном распаде 1 кг урана.

Вероятность реакции между двумя сближающимися легкими ядрами пропорциональна

$$\exp\left(-\frac{KZ_1Z_2}{\sqrt{W}}\right),$$

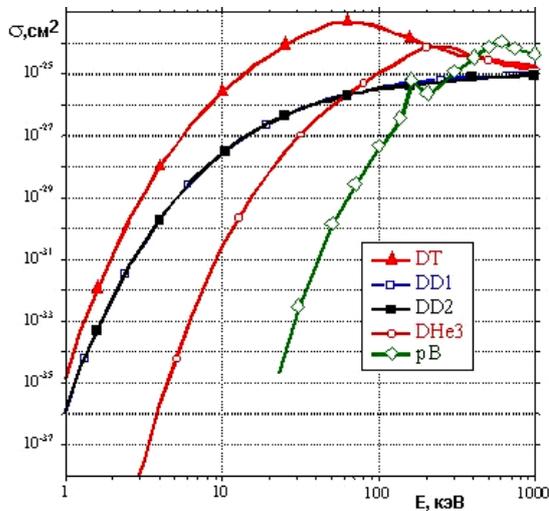
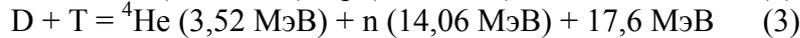
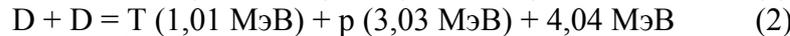
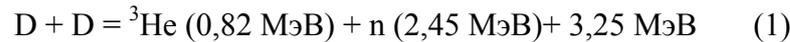
где Z_1 и Z_2 – числа протонов во взаимодействующих ядрах, W – энергия их относительного сближения, а K – постоянный множитель. Энергия, необходимая для осуществления реакции, зависит от числа протонов в каждом ядре. Если оно больше трех, то эта энергия слишком велика и реакция практически неосуществима. Таким образом, с возрастанием Z_1 и Z_2 вероятность реакции уменьшается.

Вероятность того, что два ядра вступят во взаимодействие, характеризуется «сечением реакции», измеряемом в барнах ($1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$). Сечение реакции – это площадь эффективного поперечного сечения ядра, в которое должно «попасть» другое ядро, чтобы произошло их взаимодействие. Сечение реакции дейтерия с тритием достигает максимальной величины (5 барн), когда взаимодействующие частицы имеют энергию относительного сближения порядка 200 кэВ. При энергии 20 кэВ сечение становится меньше 0,1 барн. Из миллиона попадающих на мишень ускоренных частиц не более одной вступает в ядерное взаимодействие. Остальные рассеивают свою энергию на электронах атомов мишени и замедляются до скоростей, при которых реакция становится невозможной. Следовательно, способ бомбардировки твердой мишени ускоренными ядрами для термоядерного синтеза непригоден, так как получаемая при этом энергия намного меньше затраченной.

При нагреве смеси реагирующих ядер до очень высоких температур кинетическая энергия теплового движения ядер становится достаточно высокой для осуществления реакции ядерного синтеза, получивших название термоядерных реакций.

1.2 Реакции ядерного синтеза

В термоядерных реакторах используется энергия, выделяющаяся при слиянии легких атомных ядер. Например:



Известны и другие термоядерные реакции, например реакции слияния ядер протия с протием или с дейтерием ${}^4\text{He}$ с ${}^7\text{Li}$ или ${}^9\text{Be}$, которые также являются экзотермическими (Табл. 1). Реакция слияния ядер трития и дейтерия является наиболее перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза, так как ее сечение даже при низких энергиях достаточно велико.

Рис. 1. Сечения некоторых термоядерных реакций из таблицы 1, как функция энергии частиц в системе центра масс.

Табл. 1. Энергетические характеристики термоядерных реакций.

Реакция*	Энерго-выделение, МэВ	$\sigma_{\text{макс}}$, барн (в области энергии <1 МэВ)	Энергия налетающей частицы, МэВ, отвечающая $\sigma_{\text{макс}}$
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	2,2	10^{-23}	-
$p + D \rightarrow \text{He}^3 + \gamma$	5,5	10^{-6}	-
$D + D \rightarrow T + p$	4,0	0,16 (при 2 МэВ)	2,0
$D + D \rightarrow \text{He}^3 + p$	3,3	0,09	1,0
$D + T \rightarrow \text{He}^3 + n$	17,6	5	0,10
$D + T \rightarrow \text{He}^4 + n$	17,6	5	0,15
$T + T \rightarrow \text{He}^4 + n$	11,3	0,10	1,0
$D + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + p$	18,3	0,80	0,45
$n + \text{Li}^6 \rightarrow \text{He}^4 + T$	4,8	закон $\sigma \sim 1/v$	-
$p + \text{Li}^7 \rightarrow 2\text{He}^4$	17,3	10^{-3}	0,25
$D + \text{Li}^6 \rightarrow D + 2\text{He}^4$	22,4	0,026	0,60

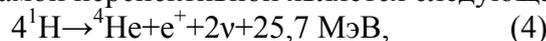
*Во всех приведенных реакциях налетающей частицей является первая слева.

Вследствие большого сечения рассеяния при бомбардировке ядер трития ускоренными дейтонами энергетический баланс процесса термоядерного синтеза по D – T реакции может быть отрицательным, т.е. на ускорение дейтонов затрачивается больше энергии, чем выделяется при синтезе. Положительный энергетический баланс возможен только в том случае, если бомбардирующие частицы после упругого столкновения будут способны вновь участвовать в реакции. Для преодоления электрического отталкивания атомные ядра должны обладать большой кинетической энергией. Эти условия могут быть созданы в высокотемпературной плазме (плазмой называют газ, в котором атомы или молекулы находятся полностью ионизированном состоянии). D – T – реакция начинает протекать только при температуре $\sim 10^7$ К. Лишь при этой температуре выделяется больше энергии на единицу объема и в единицу времени, чем затрачивается.

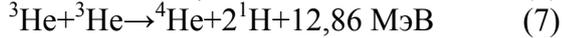
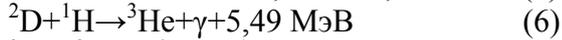
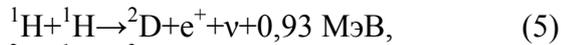
1.3 Термоядерные топлива

Реакции с участием протонов, играющие основную роль в процессах ядерного синтеза на Солнце и других гомогенных звездах, в земных условиях не представляют практического интереса, поскольку имеют слишком малое сечение.

H-H – реакция. Казалось бы, самой перспективной является следующая реакция ядерного синтеза:



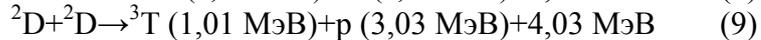
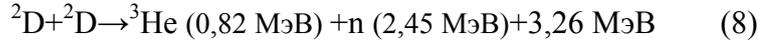
в которой реагирует обычный водород (протий), а образуется α -частица, позитроны и выделяется тепло. И хотя на один атом гелия тут тепла выделяется в 7,5 раз меньше, чем на один атом урана при делении его ядра, но масса атома гелия в 59 раз меньше массы атома урана. Поэтому "калорийность" водородного "топлива" в пересчете на килограмм вещества почти в 8 раз выше, чем уранового. Отметим, что подобная реакция в природе не существует. Она написана как сумма трёх последовательных ядерных реакций:



Эту группу реакций называют водородным циклом и предполагают, что по такой цепочке реакций происходит превращение водорода в гелий в недрах большинства звезд, в том числе и Солнца. Первую из этих ядерных реакций в земных условиях никто никогда не наблюдал, даже на ускорителях со встречными пучками протонов. Но поскольку в природном водороде всегда имеются примеси дейтерия ${}^2\text{D}$, то такая реакция в звездах все-таки идет. Других путей для появления дейтерия в природе теоретики не видят.

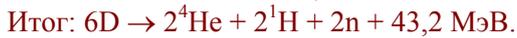
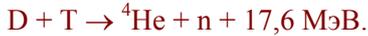
D-D – реакция. В любом природном соединении водорода на 6800 атомов протия ${}^1\text{H}$ приходится один атом дейтерия ${}^2\text{D}$ (это 0,015%.) Дейтерий считается надеждой человечества в решении энергетической проблемы. Ведь технология выделения тяжелой (дейтериевой) воды из обычной достаточно хорошо отработана, а потому добыча дейтерия - не проблема, хоть и дорогое удовольствие. Его запасы в водах мирового океана практически безграничны.

D-D – реакцию можно считать практически осуществимой на Земле. Эта реакция может протекать по двум равновероятным каналам:

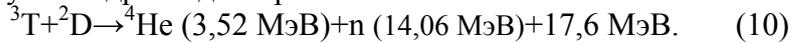


в результате которой начнется энергосвободное.

Замечание. Полный цикл ядерных реакций дейтериевого горения:

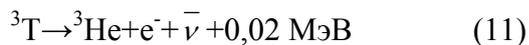


Во второй из этих реакций получается, правда, тритий, ${}^3\text{T}$, а не гелий, но и тритий пригодится: его ядра довольно активно реагируют с ядрами дейтерия:



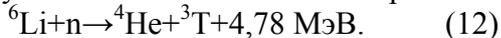
Оказалось, что последнюю реакцию наиболее легко зажечь в земных условиях (требуется нагреть смесь дейтерия с тритием "всего" до 100 миллионов градусов). Поэтому она и была осуществлена еще в начале 50-х годов в водородной бомбе, в которой требуемая для реакции температура создавалась взрывом атомной бомбы.

D-T- реакция. Реакция синтеза дейтерия и трития обладает относительно большим сечением и обеспечивает удельную теплотворную способность $3.5 \cdot 10^{11}$ Дж/г. Если осуществлять термоядерный синтез по D-T- реакции, то нужен тритий. А природных запасов его не существует, так как ядра трития со временем распадаются по реакции



с периодом полураспада 12,6 лет.

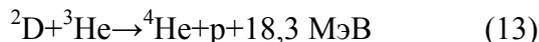
Тритий можно нарабатывать, облучая литий-6 потоками нейтронов от ядерного реактора:



При этом не только образуется тритий, но и выделяется энергия.

В будущем предполагают получать необходимые потоки нейтронов уже не от ядерных реакторов с ураном, а от термоядерных, то есть производить тритий там же, где он будет использоваться. Если окружить термоядерную камеру слоем ${}^6\text{Li}$ (в природном литии его содержится 7%), то можно осуществить полное воспроизводство расходуемого трития. И хотя на практике часть нейтронов неизбежно теряется, их потерю легко восполнить, вводя в оболочку такой элемент, как бериллий, ядро которого, при попадании в него одного быстрого нейтрона, испускает два.

D- ${}^3\text{He}$ -реакция. Реакция



может быть использована для создания малорадиоактивного термоядерного реактора. В D- ${}^3\text{He}$ - реакции основную энергию несут заряженные продукты реакции, а нейтроны возникают лишь в D-D и в D-T реакциях при выгорании рождающегося в D-D реакциях трития. Важно, что можно уменьшить в 50 раз его выход. В результате биологическая опасность термоядерного реактора может быть снижена на четыре-пять порядков величины по сравнению с ядерными реакторами деления, отпадет необходимость промышленной обработки радиоактивных материалов и их транспортировки, качественно упрощается захоронение радиоактивных отходов.

Правда, для осуществления этой реакции нужны температуры в 8 раз большие, чем для D-T –реакции, к тому же на Земле практически нет изотопа гелия-3.

Поскольку на одну реакцию синтеза D-T приходится около 10^5 обычных столкновений ядер, проблема термоядерного синтеза состоит в решении двух задач: нагрева вещества до необходимых температур и его удержания на время, достаточное для "сжигания" заметной части термоядерного топлива. Это время определяется критерием Лоусона.

Лоусона критерий (1957 г.) - условие возникновения термоядерной реакции $n\tau \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}\text{с}$, где τ - время удержания высокотемпературной плазмы в системе, n – плотность её частиц. При выполнении Лоусона критерия энергия, выделяющаяся при управляемом термоядерном синтезе, превышает энергию, вводимую в систему.

Замечание. Важно понимать, что критерий Лоусона – грубая оценка. Он занижен, по крайней мере, на два порядка. Можно гарантировать, что когда этот критерий будет достигнут на экспериментальных установках, никакого управляемого термоядерного синтеза с энергетическим выигрышем не произойдет.

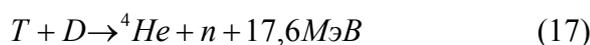
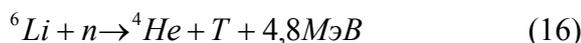
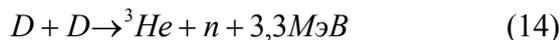
2. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В ЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время в земных условиях реакция термоядерного синтеза осуществляется двумя способами:

- 1) Взрыв водородной бомбы;
- 2) Облучение дейтерида лития тепловыми нейтронами.

2.1 Водородная бомба

Водородная бомба состоит из взрывателя, обеспечивающего температуру до нескольких миллионов градусов (обычно используется атомная бомба), и дейтерида лития-6. При высокой температуре с этими ядрами происходят следующие реакции:



Высокая температура при взрыве атомной бомбы сохраняется только в течение нескольких миллионных долей секунды. Поэтому исходные вещества должны иметь максимальную плотность. Скорость выделения энергии при этих условиях очень велика 10^{17} Дж за 10^{-5} с или 10^{23} Вт. Для использования в качестве источника энергии термоядерное оружие не годится. Ведь мощность самых крупных из существующих сейчас электростанций не превышает 10^{10} Вт. Скорость реакций в промышленном термоядерном реакторе должна быть существенно больше, чем на Солнце, и столь же существенно меньше, чем в водородной бомбе.

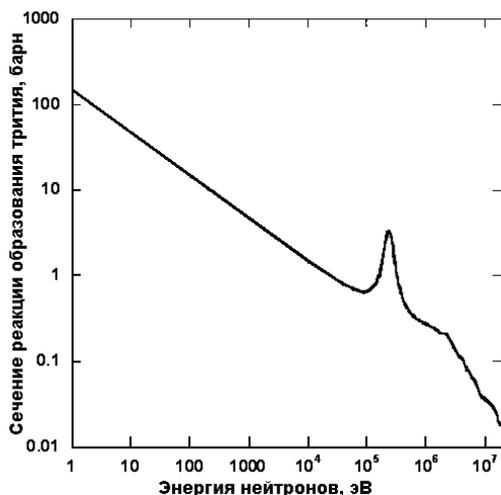
2.2 Термоядерный синтез в тепловом урановом реакторе

Взрыв водородной бомбы – неуправляемый термоядерный синтез, что делает его непригодным для энергетических целей. Между тем в лабораторных условиях управляемый термоядерный синтез осуществить достаточно просто. Для этого достаточно опустить в канал любого реактора, работающего на реакции деления урана тепловыми нейтронами, ампулу с дейтеридом лития. При этом никаких высоких температур не потребуется – интересующий процесс пойдет и при комнатной температуре. То, что в ампуле идет ядерная реакция между дейтерием и тритием, мы немедленно обнаружим по появлению высокоэнергетичных нейтронов (энергия нейтронов 14 МэВ).

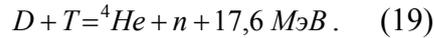
Действительно, если используемый литий обогащен стабильным изотопом ${}^6\text{Li}$ (можно использовать и природный литий, поскольку в нем содержится 7% ${}^6\text{Li}$), то под действием тепловых нейтронов атомного реактора пойдет следующая ядерная реакция:



Рис. 2. Энергетическая зависимость сечения взаимодействия нейтронов с изотопами лития.



В результате этой реакции, возникают «горячие» атомы трития. Энергии атома отдачи трития (порядка 3 МэВ) вполне достаточно для протекания реакции взаимодействия трития с находящимся в дейтериде лития дейтерием:



Для энергетических целей этот метод не годится: затраты энергии на процесс превышают выделяющуюся энергию. Поэтому приходится искать другие варианты осуществления управляемого термоядерного синтеза, варианты, обеспечивающие большой энергетический выигрыш.

3. УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

3.1 Временные и температурные условия

Управляемый термоядерный синтез - научная проблема осуществления синтеза легких ядер с целью производства энергии. Проблема может быть решена в плазме при температуре выше 10^8K и выполнении Лоусона критерия ($n\tau > 10^{14} \text{ с/см}^3$, где n - плотность высокотемпературной плазмы, τ - время удержания ее в системе).

Получение полезной термоядерной энергии возможно при выполнении двух условий. 1) Предназначенная для синтеза смесь должна быть нагрета до температуры, при которой кинетическая энергия ядер обеспечивает высокую вероятность их слияния при столкновении. 2) Реагирующая смесь должна быть очень хорошо термоизолирована (т.е. высокая температура должна поддерживаться достаточно долго, чтобы произошло необходимое число реакций и выделившаяся за счет этого энергия превышала энергию, затраченную на нагрев топлива).

Из трех ключевых параметров термоядерного синтеза - температуры, плотности и времени удержания плазмы - один, температура, задается выбранной реакцией. Соотношение двух других можно варьировать. Соответственно есть два основных пути: либо выбрать относительно низкую плотность топлива и продолжительное время удержания, либо, наоборот, максимально возможную плотность при очень небольшой продолжительности реакции.

На первом пути наибольших успехов удалось добиться, изолируя горячую плазму от контакта с холодными стенками реактора с помощью магнитного поля. Это технология магнитного удержания. Она основана на способности магнитного поля оказывать давление на плазму и снижать ее теплопроводность. Второй подход реализован пока только в термоядерной бомбе. Топливо здесь имеет плотность твердого тела, а то и еще выше - за счёт сжатия при срабатывании запала в виде атомной бомбы. Давление такой плазмы составляет миллионы атмосфер, и противостоять ему, конечно, невозможно. Но выиграть какое-то время позволяют силы инерции - даже при огромном давлении расширение вещества не может произойти мгновенно. Такой способ удержания называют инерционным, поскольку кроме инерции плазму ничто не удерживает. Она разлетается со скоростью звука, которая при температуре 100 миллионов градусов составляет около 600 км/с. За 5 миллиардных долей секунды плазма расширится на 3 миллиметра. Как раз такого размера термоядерные заряды можно безопасно взрывать в камере реактора в виде прочной сферы диаметром метров 10. Энергия подобного «микровзрыва» составит около миллиарда джоулей, или 250 килограммов тротила. Если взрывы повторять 5 раз в секунду, то с учетом КПД преобразования энергии электрическая мощность реактора получится около 1 миллиона киловатт.

Чтобы нагреть термоядерную смесь, одному кубическому сантиметру её объема надо сообщить энергию $E_1 = knT$, где k - численный коэффициент, n - плотность смеси (количество ядер в 1 см^3), T - требуемая температура. Для поддержания реакции сообщенная термоядерной смеси энергия должна сохраняться в течение времени τ . Чтобы реактор был энергетически выгоден, нужно, чтобы за это время в нем выделилось термоядерной энергии больше, чем было потрачено на нагрев. Выделившаяся энергия (также на 1 см^3) выражается следующим образом:

$$E_2 = n^2 R f(T) \tau, \quad (20)$$

где $f(T)$ - коэффициент, зависящий от температуры смеси и ее состава, R - энергия, выделяющаяся в одном элементарном акте синтеза. Тогда условие энергетической рентабельности $E_2 > E_1$ примет вид

$$n^2 > (k/R) [T/f(T)] \quad (21)$$

или

$$n\tau > (k/R) [T/f(T)]. \quad (22)$$

Последнее неравенство, известное под названием критерия Лоусона, представляет собой количественное выражение требований к совершенству термоизоляции. Правая часть - «число Лоусона» - зависит только от температуры и состава смеси, и чем оно больше, тем жестче требования к термоизоляции, т.е. тем труднее создать реактор. Число Лоусона для чистого дейтерия составляет 10^{16} с/см^3 , а для

равнокомпонентной DT-смеси – $2 \cdot 10^{14}$ с/см³. Поэтому DT-смесь является более предпочтительным термоядерным топливом.

В соответствии с критерием Лоусона, определяющим энергетически выгодную величину произведения плотности на время удержания, в термоядерном реакторе следует использовать по возможности большие n либо τ . Поэтому исследования УТС разошлись по двум разным направлениям: в первом исследователи пытались с помощью магнитного поля в течение достаточно длительного времени удерживать относительно разреженную плазму; во втором – с помощью лазеров на короткое время создать плазму с очень высокой плотностью.

При использовании способа **магнитного удержания**, плазму помещают в магнитное поле. В идеальном случае магнитное удержание позволяет осуществить стационарное выделение термоядерной мощности - наиболее привлекательный режим энергетических реакторов. В способе **инерционного удержания** - порцию термоядерного топлива импульсно нагревают до температур -30-50 млн. градусов, и α -частицы начинающихся реакций синтеза увеличивают нагрев плазмы, если выполняется условие их торможения в топливе: $nr > 0.3$ г/см³ (n - плотность топлива, r - размер). Численно это условие совпадает с критерием Лоусона. Выделение энергии носит взрывообразный характер и происходит за время, меньшее времени теплового разлета вещества, определяемого его инерцией. Взрыв термоядерной бомбы доказал принципиальную осуществимость инерционного удержания плазмы. Для энергетики важно определить наименьшую массу топлива, чтобы рассматривать схемы реакторов с повторяющимися взрывами. Мощность импульсных источников энергий, обеспечивающих сжатие и последующий микровзрыв, должна быть очень большой ($>10^{14}$ Вт).

3.2 Магнитное удержание плазмы

Во время реакции синтеза плотность горячего реагента должна оставаться на уровне, который обеспечивал бы достаточно высокий выход полезной энергии на единицу объема при давлении, которое в состоянии выдержать камера с плазмой. Например, для смеси дейтерий – тритий при температуре 10^8 К выход определяется выражением

$$E=2,5 \cdot 10^{-28} n^2 \text{ Вт/см}^3. \quad (23)$$

Если принять E равным 100 Вт/см^3 (что примерно соответствует энергии, выделяемой топливными элементами в ядерных реакторах деления), то плотность n должна составлять 10^{15} ядер/см³, а соответствующее давление nT – 3 МПа. Время удержания при этом, согласно критерию Лоусона, должно быть не менее 0,1 с. Для дейтерий-дейтериевой плазмы при температуре 10^9 К

$$E=8 \cdot 10^{-30} n^2 \text{ Вт/см}^3. \quad (24)$$

В этом случае при $E = 100 \text{ Вт/см}^3$, $n = 3 \cdot 10^{15}$ ядер/см³ и давлении примерно 100 МПа требуемое время удержания составит более 1 с. Заметим, что указанные плотности составляют лишь 0,0001 от плотности атмосферного воздуха, так что камера реактора должна откачиваться до высокого вакуума.

Приведенные выше оценки времени удержания, температуры и плотности являются типичными минимальными параметрами, необходимыми для работы термоядерного реактора, причем легче они достигаются в случае дейтерий-тритиевой смеси. Что касается термоядерных реакций, протекающих при взрыве водородной бомбы и в недрах звезд, то следует иметь в виду, что в силу совершенно иных условий в первом случае они протекают очень быстро, а во втором – крайне медленно по сравнению с процессами в термоядерном реакторе.

3.2.1 Плазма

Термоядерные реакции протекают при высоких температурах. Настолько высоких, что любое вещество переходит в четвертое состояние – состояние плазмы.

Плазма (от греч. - вылепленное, оформленное), частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

При достаточно сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. Если увеличивать температуру и дальше, резко усилится процесс термической ионизации, т. е. молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, которые затем превращаются в ионы и свободные электроны. При температурах более миллиона градусов газ, состоящий из легких элементов, полностью ионизируется, т.е. каждый его атом утрачивает все свои электроны. Ионизация газа, кроме того, может быть вызвана его взаимодействием с электромагнитным излучением или бомбардировкой газа заряженными частицами. Свободные заряженные частицы - легко перемещаются под действием электрического поля. Поэтому в состоянии равновесия пространственные заряды входящих в состав плазмы отрицательных электронов и положительных ионов компенсируют друг друга так, чтобы полное поле внутри плазмы равно нулю. Отсюда

вытекает необходимость практически точного равенства плотностей электронов и ионов в плазме - её "квазинейтральности". Нарушение квазинейтральности в объёме, занимаемом плазмой, ведёт к появлению сильных электрических полей пространственных зарядов, тут же восстанавливающих квазинейтральность. Степенью ионизации плазмы называется отношение числа ионизованных атомов к полному их числу в единице объёма плазмы.

Средние энергии различных типов частиц, составляющих плазмы, могут отличаться одна от другой. В таком случае плазму нельзя охарактеризовать одним значением температуры и различают электронную температуру T_e , ионную температуру T_i , (или ионные температуры, если в плазме имеются ионы нескольких сортов) и температуру нейтральных атомов T_a (нейтральной компоненты). Подобная плазма называется неизотермической, в то время как плазма, для которой температуры всех компонент равны, называется изотермической. Низкотемпературной принято считать плазму с $T_i = 10^5$ К, а высокотемпературной - плазмой с $T_i = 10^6 - 10^8$ К и более. Возможные значения плотности плазмы n (число электронов или ионов в см^3) расположены в очень широком диапазоне: от $n \sim 10^{-6}$ в межгалактическом пространстве и $n \sim 10$ в солнечном ветре до $n \sim 10^{22}$ для твёрдых тел и ещё больших значений в центральных областях звёзд.

В резком отличии свойств плазмы от свойств нейтральных газов определяющую роль играют два фактора. 1) Взаимодействие частиц плазмы между собой характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания, убывающими с расстоянием гораздо медленнее (т. е. значительно более "дальнодействующими"), чем силы взаимодействия нейтральных частиц. По этой причине взаимодействие частиц в плазме является не "парным", а "коллективным" - одновременно взаимодействует друг с другом большое число частиц. 2) Электрические и магнитные поля очень сильно действуют на плазму, вызывая появление в плазме объёмных зарядов и токов и обуславливая целый ряд специфических свойств плазмы. Эти отличия позволяют рассматривать плазму как особое, четвёртое состояние вещества.

Если в плазме не возбуждены какие-либо интенсивные колебания и неустойчивости, то столкновения частиц определяют её свойства - электропроводность, вязкость, теплопроводность и диффузию. Плазма очень хорошо проводит электрический ток, очень велика и теплопроводность плазмы. Плазму можно нагревать, пропуская через нее электрический ток. В полностью ионизованной плазме электропроводность не зависит от плотности плазмы и пропорциональна $T^{3/2}$; при высоких температурах плазму можно рассматривать как идеальный проводник. Если такая плазма движется в магнитном поле, то эдс при обходе любого замкнутого контура, движущегося вместе с плазмой, равна нулю, что по закону Фарадея для индукции электромагнитной приводит к постоянству магнитного потока, пронизывающего контур. Этим обусловлена возможность самовозбуждения магнитного поля за счёт увеличения длины магнитных силовых линий при хаотическом турбулентном движении среды.

В разреженной плазме, где можно пренебречь столкновениями, заряженная частица летит вдоль магнитной силовой линии, быстро вращаясь по ларморовской спирали. При наличии возмущающей силы частица также медленно "дрейфует" в направлении, перпендикулярном как магнитному полю, так и направлению этой силы. Например, в электрическом поле, направленном под углом к магнитному, происходит "электрический дрейф". Если же электрическое поле отсутствует, но магнитное поле неоднородно, то имеет место "центробежный дрейф" в направлении бинормали к силовой линии, а в продольном направлении диамагнитная сила тормозит частицу, приближающуюся к области более сильного магнитного поля. При этом остаются неизменными полная энергия частицы и её магнитный момент. Такими свойствами удержания плазмы обладают зеркальные магнитные ловушки в установках для УТС.

При описании плазмы с помощью уравнений магнитной гидродинамики она рассматривается как сплошная среда, в которой могут протекать токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создаёт объёмные электродинамические силы, которые должны уравновешивать газодинамическое давление плазмы, аналогичное давлению в нейтральном газе. Если поле не проникает в плазму, то на границе плазмы газодинамическое давление равно внешнему магнитному давлению. Простейший пример такого равновесия - **Z-пинч**, возникающий при разряде между двумя электродами. Равновесие зет-пинча неустойчиво - на нём легко образуются желобки, идущие вдоль магнитного поля. При последующем развитии они превращаются в тонкие перетяжки и могут приводить к обрыву тока. В мощных разрядах с токами 10^6 а в дейтериевой плазме такой процесс сопровождается некоторым числом ядерных реакций и испусканием нейтронов, а также жёстких рентгеновских лучей. Если внутри пинча создать продольное магнитное поле, то, двигаясь вместе с плазмы, оно своим давлением препятствует развитию перетяжек. Если отношение напряженностей параллельного к перпендикулярному полю больше отношения большого и малого радиуса тора шаг винтовых силовых линий полного поля оказывается больше длины замкнутого плазменного шнура и желобковая неустойчивость не развивается. Такие системы, называются **токамаками**.

При наличии магнитного поля в однородной плазме возможны волны шести типов: три высокочастотные и три низкочастотные. Если температура или плотность плазмы в магнитном поле неоднородны, то возможны ещё так называемые "дрейфовые" волны. При больших амплитудах возможны "бесстолкновительные" ударные волны, уединённые волны (солитоны), а также ряд др. "нелинейных" волн и, наконец, сильноразвитая турбулентность движения плазмы. В неравновесной плазме при определённых условиях возможна "раскачка неустойчивостей", т. е. нарастание какого-либо из перечисленных типов волн до некоторого уровня насыщения.

3.2.2 Плазма и УТС

Чтобы запустить термоядерный синтез, плазму нужно нагреть. Но когда реакция уже началась, она сама может помочь в поддержании нужной температуры. В реакции дейтерия с тритием 80% выделяющейся энергии уносит нейтрон, а 20% - ядро гелия. Чтобы использовать энергию нейтронов, термоядерный реактор окружают специальной стенкой - бланкетом, содержащим замедлители нейтронов и каналы с охлаждающей жидкостью. Эта энергия передается водяному пару и преобразуется в электричество. Но в подогреве плазмы нейтроны участия не принимают. Зато 20% энергии, приходящейся на долю ядра гелия, использовать для этого можно. Благодаря электрическому заряду ядро гелия в столкновениях с электронами и ядрами дейтерия и трития отдает им свою энергию. Если еще наложить магнитное поле, чтобы замедлить уход ядер гелия, их энергия пойдет на нагрев плазмы почти полностью. Тогда реакция сможет поддерживать себя сама, а источники тепла, которые использовались для первоначального нагрева плазмы до зажигания, можно будет выключить.

Чтобы удержать плазму, например, при температуре 10^8K , её нужно надежно термоизолировать. Изолировать плазму от стенок камеры можно, поместив ее в сильное магнитное поле. Это обеспечивается силами, которые возникают при взаимодействии токов с магнитным полем в плазме. Под действием магнитного поля ионы и электроны движутся по спиралям вдоль его силовых линий. В отсутствие электрических полей высокотемпературная разреженная плазма, в которой столкновения происходят редко, будет лишь медленно диффундировать поперек магнитных силовых линий. Если силовые линии магнитного поля замкнуть, придав им форму петли, то частицы плазмы будут двигаться вдоль этих линий, удерживаясь в области петли.

На практике осуществить магнитное удержание плазмы достаточно большой плотности не просто: в ней часто возникают магнитогидродинамические и кинетические неустойчивости. Магнитогидродинамические неустойчивости связаны с изгибами и изломами магнитных силовых линий. В этом случае плазма может начать перемещаться поперек магнитного поля в виде сгустков, за несколько миллионных долей секунды уйдет из зоны удержания и отдаст тепло стенкам камеры. Такие неустойчивости можно подавить, придав магнитному полю определенную конфигурацию. Кинетические неустойчивости очень многообразны. Среди них есть такие, которые срывают упорядоченные процессы, как, например, протекание через плазму постоянного электрического тока или потока частиц. Другие кинетические неустойчивости вызывают более высокую скорость поперечной диффузии плазмы в магнитном поле, чем предсказываемая теорией столкновений для спокойной плазмы.

3.2.3 Системы с замкнутой магнитной конфигурацией

Если к ионизованному проводящему газу приложить сильное электрическое поле, то в нем возникнет разрядный ток, одновременно с которым появится окружающее его магнитное поле. Взаимодействие магнитного поля с током приведет к появлению действующих на заряженные частицы газа сжимающих сил. Если ток протекает вдоль оси проводящего плазменного шнура, то возникающие радиальные силы подобно резиновым жгутам сжимают шнур, отодвигая границу плазмы от стенок содержащей ее камеры. Это явление названо **пинч-эффектом**.

Пинч-эффект (pinch - сужение, сжатие) - эффект сжатия, стягивания сильноточного газового разряда (плазменного образования) в результате взаимодействия тока разряда с магнитным полем, собственным или внешним.

Пинч – эффект ("щипок", "толчок") - сжатие сильноточного газового разряда в результате взаимодействия тока разряда с собственным или внешним магнитным полем. В плазменных установках под пинч-эффектом понимают сжатие плазмы под действием протекающего в нем тока.

Известно, что один из наиболее существенных механизмов силового действия тока на проводник связан со взаимодействием тока с порождаемым им магнитным полем (пинч-эффект). Механизм образования упругих напряжений при пинч-эффекте состоит в следующем. Электрический ток в проводнике приводит к возникновению в нем магнитного поля, которое действует с силой Лоренца на вызвавший это поле дрейфующий электронный газ. Независимо от направления тока такая сила самодействия всегда направлена к

центру проводника перпендикулярно направлению тока. В результате электронный газ сжимается к центру проводника, образуя отрицательный объемный электрический заряд, а у поверхности проводника, где концентрация электронов понижается, формируется положительный заряд (при этом полный заряд проводника остается равным нулю). Вследствие такой поляризации в проводнике образуется поперечное к току электрическое поле (поле Холла), которое, действуя с силой Кулона на ионную решетку, приводит к ее упругому сжатию с образованием механических напряжений.

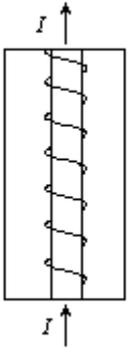


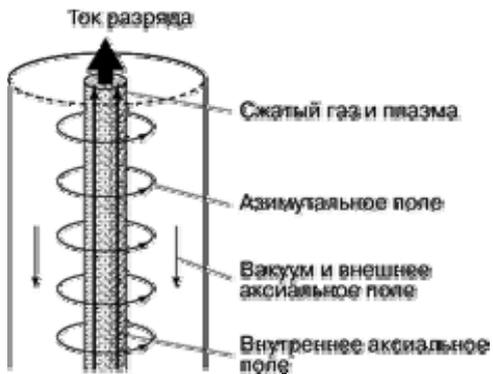
Рис. 3. Сужение плазмы в плазменный шнур.

Во время прохождения линейного заряда вокруг него возникают электрические кольцевые токи, обладающие периодическим сжимающим действием. Пинч-эффект наблюдается при исследовании электрических разрядов с большой силой тока в прямых разрядных трубках. Ток, текущий по такому газообразному проводнику (ионизированному газу) окружает себя кольцевыми силовыми линиями магнитного поля. Взаимодействие тока с его собственным магнитным полем создает силу, сжимающую разрядный столб. В результате такого сжатия разряд сжимается в узкий шнур (**Рис. 3**).



Рис. 4. Неустойчивый плазменный шнур. Силовые линии магнитного поля сгущаются с вогнутой стороны, усиливая изгиб.

Метод пинча применяется для удержания плазмы; особенность - нагрев газа до высоких температур самим электрическим током. Помимо диффузии плазмы в радиальном направлении, наблюдается еще продольный дрейф и выход ее через торцы плазменного шнура. Потери через торцы можно устранить, если придать камере с плазмой форму бублика. В этом случае получается **тороидальный пинч**. Серьезной проблемой являются присущие пинчу магнитогидродинамические неустойчивости. Дело в том, что при пинч-эффекте появляется не только поперечное сжатие шнура плазмы магнитным полем, но и возникает ряд новых эффектов. Например, взаимодействие стягивает одноименные токи в сгустки, разрывая плазму, а из-за разделения зарядов возникают плазменные колебания.



Если у плазменного шнура возникает небольшой изгиб, то плотность силовых линий магнитного поля с внутренней стороны изгиба увеличивается (**Рис. 4**). Магнитные силовые линии, которые ведут себя подобно сопротивляющимся сжатию жгутам, начнут быстро «выпучиваться», так что изгиб будет увеличиваться вплоть до разрушения всей структуры плазменного шнура. В результате плазма вступит в контакт со стенками камеры и охладится.

Рис. 5. Схема стабилизации плазменного шнура магнитным полем (Плазменный шнур можно защитить от неустойчивости изгиба аксиальными полями, создаваемыми внутри и снаружи токонесущего шнура).

Чтобы исключить это губительное явление, до пропускания основного аксиального тока в камере создают продольное магнитное поле, которое вместе с приложенным позднее круговым полем «выпрямляет» зарождающийся изгиб плазменного шнура (**Рис. 5**). Принцип стабилизации плазменного шнура аксиальным полем положен в основу двух перспективных проектов термоядерных реакторов – токамака и пинча с обращенным магнитным полем.

3.2.4 Открытые магнитные конфигурации

В системах открытой конфигурации проблема удержания плазмы в продольном направлении решается путем создания магнитного поля, силовые линии которого вблизи торцов камеры имеют вид сужающегося пучка. Заряженные частицы движутся по винтовым линиям вдоль силовой линии поля и отражаются от областей с более высокой напряженностью (где плотность силовых линий больше). Такие конфигурации (**Рис. 6**) называются ловушками с магнитными пробками, или магнитными зеркалами. Магнитное поле

создается двумя параллельными катушками, в которых протекают сильные одинаково направленные токи. В пространстве между катушками силовые линии образуют «бочку», в которой и располагается удерживаемая плазма. Однако такие системы не в состоянии удерживать плазму той степени плотности, которая необходима для работы реактора.

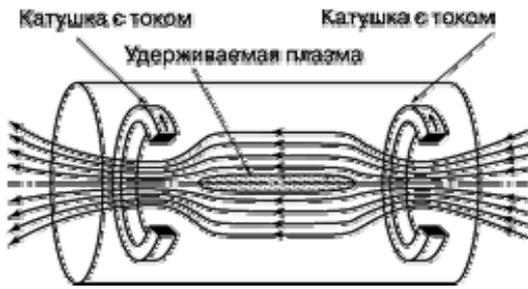


Рис. 6. Классическая магнитная ловушка плазмы с катушками, которые создают поле, отражающее частицы к центру камеры реактора и таким образом удерживающее плазму в ограниченном пространстве.

4. УСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

Одной из первых и самых простых попыток реализовать идею магнитного удержания является **Z-пинч** - плазменный шнур между двумя электродами, ток в котором создает азимутальное магнитное поле, призванное сжимать и удерживать плазму.

Z-пинч («зет-пинч») - сжатие, возникающее при разряде между двумя электродами.

На идее Z-пинча работают замкнутые тороидальные установки **токамак** и **стелларатор**: шнур, изогнутый в тор, избавлен от прямого контакта горячей плазмы с электродами, а неустойчивости пинча преодолеваются усложнением структуры поля с помощью дополнительных внешних токов, окружающих тор.

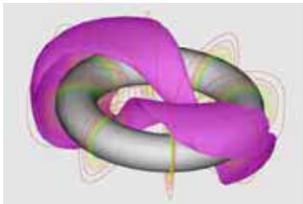


Рис. 7. Магнитные поверхности в равновесной плазменной конфигурации

Магнитные методы удержания плазмы используются в установках тороидального типа, таких, как токамак и пинч с обращенным магнитным полем.

Для удержания плазмы при помощи тороидального магнитного поля необходимо создать условия, при которых плазма не смещалась бы к стенкам тора. Это достигается «скручиванием» силовых линий магнитного поля (т.н. «вращательным преобразованием»). Такое скручивание осуществляется двумя способами. В первом способе через плазму пропускается ток, приводящий к конфигурации устойчивого пинча. Возникает конфигурация, известная под названием токамак («Тороидальная КАмера с МАгнитными Катушками»). **Токамак (Рис. 8).**

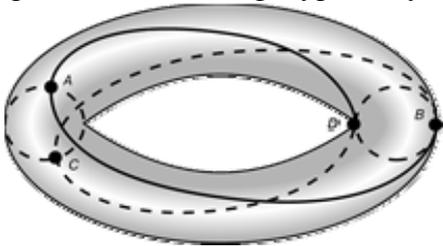


Рис. 8. Тороидальное поле стелларатора или токамака. Частицы, многократно обегая пространство внутри тора вдоль магнитной силовой линии, описывают тороидальную поверхность и тем самым не позволяют скапливаться электрическим зарядам. Типичная траектория частицы – ADCBA.

Во втором способе для обеспечения равновесия удерживаемой плазмы применяются специальные винтовые обмотки вокруг тороидальной плазменной камеры. Токи в этих обмотках создают сложное магнитное поле, приводящее к закручиванию силовых линий суммарного поля внутри тора. Такая установка называется **стелларатором**.

4.1 Токамак

Токамак (Тороидальная КАмера с МАгнитными Катушками) - тороидальная установка для магнитного удержания плазмы. Плазма удерживается не стенками камеры, которые не способны выдержать её температуру, а специально создаваемым магнитным полем. Особенностью токамака является использование электрического тока, протекающего через плазму для создания полоидального поля, необходимого для равновесия плазмы. Этим он отличается от стелларатора, в котором и тороидальное, и полоидальное поля создаются с помощью магнитных катушек.

Токамак - устройство для осуществления реакции термоядерного синтеза в горячей плазме в квазистационарном режиме, причем плазма создается в тороидальной камере и ее стабилизирует магнитное поле.

В установках типа токамак плазму создают внутри тороидальной камеры с помощью безэлектродного кольцевого разряда. Через плазменный сгусток пропускают электрический ток. При этом у него появляется собственное магнитное поле - сгусток плазмы как бы сам становится магнитом. Теперь с помощью внешнего магнитного поля определенной конфигурации можно подвесить плазменное облако в центре камеры, не позволяя ему соприкасаться со стенками.

В токамаке, в сущности, заложен принцип трансформатора. Разреженная смесь дейтерия и трития помещается в тороидальную трубку, вокруг которой создается сильное магнитное поле. В трубке возникает сильное вихревое электрическое поле (как в мощном понижающем трансформаторе), которое вызывает в газе ток порядка миллиона ампер. Магнитное поле, удерживающее плазму, поддерживается как за счет тока, протекающего через обмотку вокруг камеры, так и за счет тока, индуцированного в плазме. Для получения более устойчивой плазмы используется внешнее продольное магнитное поле. Вакуумная камера в форме тора заполнена смесью изотопов водорода и свободных электронов. Она охватывает стальной сердечник, играя роль вторичной обмотки трансформатора (Рис. 9). На первичную обмотку подается переменное напряжение, индуцирующее в камере электрический ток - движение электронов. Сталкиваясь с атомами, электроны высокой энергии ионизируют их - сила тока возрастает. В камере возникает плазма. На камеру надеты обмотки тороидального поля, которое сжимает плазму в шнур. Поле катушек удерживает плазменный шнур в центре камеры, не давая ему коснуться стенок.

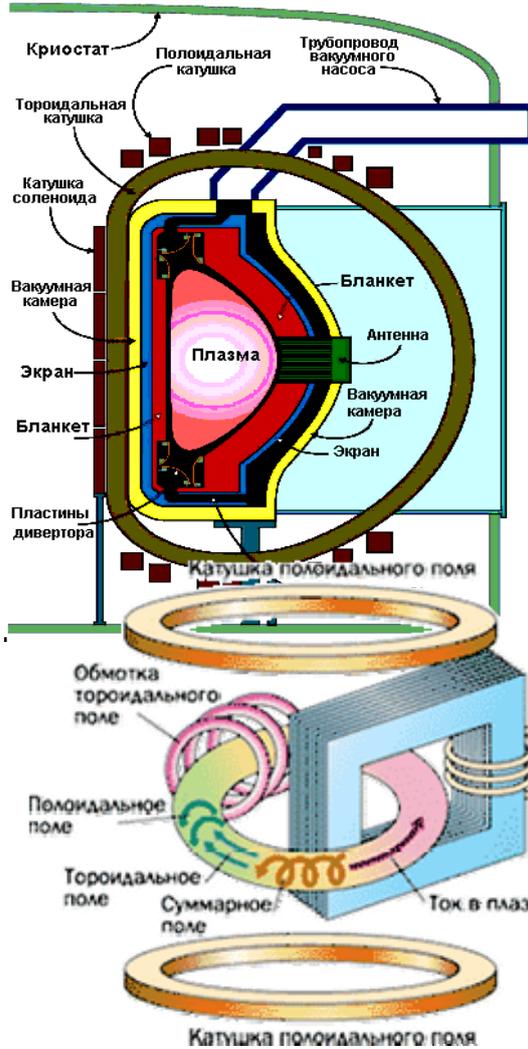


Рис. 9. Схема токамака.

Камера в токамаке - тороидальная, то есть по форме напоминает бублик (Рис. 9). Из камеры откачивают воздух, чтобы посторонние атомы не вмешивались в процесс, а затем в нее вводят дейтерий-тритиевую смесь. Снаружи расположены катушки, подключенные к переменному электрическому напряжению. Подобно первичной обмотке трансформатора, они создают кольцевой ток в водородной плазме. В газе всегда есть свободные ионы и электроны, которые начинают двигаться в камере по кругу, как в короткозамкнутой вторичной трансформаторной обмотке. Этот ток нагревает газ, количество ионизированных атомов растет, одновременно увеличивается сила тока и повышается температура плазмы. А значит, количество водородных ядер, слившихся в ядро гелия и выделивших энергию, становится все больше.

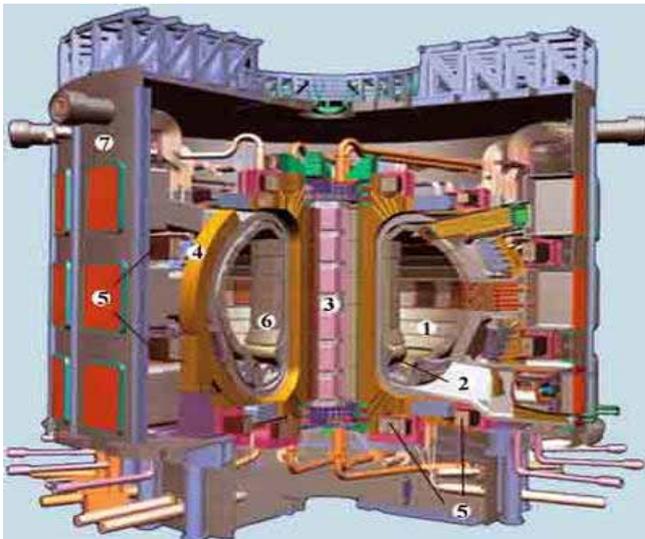
Рис. 10. Принципиальная схема токамака.

Основной нагрев идет за счёт джоулева тепловыделения. Сильно нагреваются прежде всего электроны плазмы, менее - ионы. Передача энергии от электронов к ионам идет медленно (из-за малости потока энергии). В этом состоит главное препятствие на пути

решения проблемы достижения высоких температур. Приходится применять дополнительные источники нагрева.

Теплоизоляция плазменного шнура и его удержание в токамаках достигается за счет внешнего и собственного магнитных полей. Магнитное поле сжимает плазменный шнур и отрывает его от стенки камеры. Этим достигается идеальная теплоизоляция. К сожалению, такая простая схема не привела к успеху. Плазменный шнур очень неустойчив и "живет" очень короткое время из-за разного рода пульсаций турбулентного типа. Он быстро распадается и вываливается на стенки камеры. Устойчивость плазмы можно повысить путем уменьшения кольцевого тока в плазме и использования для дополнительного нагрева мощных излучатели радиоволн сверхвысокой частоты - **гиротронов**.

Рис. 11. Термоядерный реактор ИТЭР типа токамак (проект).



Омический нагрев плазмы в токамаке недостаточен для осуществления реакции термоядерного синтеза. Это связано с тем, что при нагреве плазмы сильно уменьшается ее электрическое сопротивление, и в результате резко снижается выделение тепла при прохождении тока. Увеличивать ток в токамаке выше некоторого предела нельзя, поскольку плазменный шнур теряет устойчивость и перебрасывается на стенки камеры. Поэтому для нагрева плазмы используют различные дополнительные методы. Наиболее эффективные из них – инжекция пучков нейтральных атомов с высокой энергией и микроволновое облучение. В первом случае ускоренные до энергий 50–200 кэВ ионы нейтрализуются (чтобы избежать «отражения» их назад магнитным полем при введении в камеру) и инжектируются в плазму. Здесь они снова ионизируются и в процессе столкновений отдают плазме свою энергию. Во втором случае используется микроволновое излучение, частота которого равна ионной циклотронной частоте (частота вращения ионов в магнитном поле). На этой частоте плотная плазма ведет себя как абсолютно черное тело, т.е. полностью поглощает падающую энергию.

ТОКАМАК состоит из вакуумной камеры, образующей канал, где циркулирует плазма, магнитов, создающих поле и систем нагрева плазмы. К этому прилагаются вакуумные насосы, постоянно откачивающие газы из канала, система доставки топлива по мере его выгорания и дивертор – система, через которую полученная в результате термоядерной реакции энергия выводится из реактора. Тороидальная плазма находится в вакуумной оболочке. α - Частицы, образующиеся в плазме в результате термоядерного синтеза и находящиеся в ней, повышают ее температуру. Нейтроны через стенку вакуумной камеры проникают в зону лития, в которой их кинетическая энергия превращается в тепло и в которой воспроизводится тритий. Литиевая оболочка (бланкет) помещена в специальную оболочку, которая защищает обмотку магнита от вылетающих нейтронов и γ -излучения. Обмотка магнита (рабочая температура 4К) охлаждается жидким гелием и находится в сверхпроводящем состоянии. Из литиевого бридера удаляют образовавшиеся тритий и гелий.

Создание термоядерного реактора натолкнулось на ряд технологических трудностей.

1. При работе термоядерного реактора необходимо пополнять количество топлива (D+T) в реакторе и удалять ^4He из плазмы. Вследствие этого отдается предпочтение пульсирующему термоядерному реактору, несмотря на то, что его энергетический баланс не является наилучшим: в каждом цикле следует вводить новую газовую смесь, нагревать и удерживать ее до тех пор, пока значительная часть D и T (10-20%) не вступит в реакцию синтеза.

2. Необходимость создания магнитных полей высокой напряженности (около 100 кЭ).

3. Металлы, из которых изготавливают вакуумную камеру, должны быть устойчивыми при температуре около 1000⁰С. При больших плотностях потока нейтронов в результате протекания (n, α)- и (n,p) – реакций в этих материалах образуются пузырьки газов, возникают дефекты в кристаллической решетке; материалы становятся хрупкими и непрочными. Вследствие высокой температуры дефекты быстро распространяются во всем объеме материала. Особенно опасна бомбардировка высокоэнергетическими α -частицами: атомы гелия не растворимы в металлах, выделяются из кристаллической решетки и образуют газовые пузырьки. Давление в пузырьках растет, пузырьки «взрываются» (блистеринг), атомы металла попадают в вакуумную камеру и гасят плазму (проблема первой стенки).

4.2 Пинч с обращенным полем (ПОП)

Конфигурация ПОП отличается от токамака тем, что в ней направление тороидального поля вне плазмы противоположно его направлению внутри плазменного шнура. Такая система находится в состоянии с минимальной энергией и хорошо защищена от наиболее грубых крупноразмерных магнитогидродинамических неустойчивостей. От более мелких, локальных неустойчивостей ее в значительной мере защищает т.н. «магнитный шир» – изменение направления силовых линий суммарного магнитного поля при движении по радиусу шнура. В плазме может спонтанно возникать обращенная конфигурация поля, и когда это происходит, плазма сильнее нагревается и проявляет повышенную устойчивость. Достоинством конфигурации ПОП является то, что в ней отношение объемных плотностей энергии плазмы и магнитного поля больше, чем в токамаке. Это отношение должно быть как можно больше, чтобы уменьшить тороидальное поле, а следовательно, снизить стоимость создающих его катушек и всей несущей конструкции. Слабая сторона ПОП состоит в том, что термоизоляция у этих систем хуже, чем у токамаков, и не решена проблема поддержания обращенного поля.

4.3 Стелларатор

Здесь, как и в ТОКАМАКе, плазма подвешена в магнитном поле, но тока в ней нет. Греют плазму мощным радиоизлучением, а держат ее магнитные поля, созданные внешними катушками. В стеллараторе на замкнутое тороидальное магнитное поле налагается поле, создаваемое специальной винтовой обмоткой, навитой на корпус камеры. Суммарное магнитное поле предотвращает дрейф плазмы в направлении от центра и подавляет отдельные виды магнитогидродинамических неустойчивостей.

Стелларатор (stellar - звёздный), замкнутая магнитная ловушка для удержания высокотемпературной плазмы. Тип реактора для осуществления управляемого термоядерного синтеза.

Главным преимуществом стелларатора является то, что примененный в нем способ удержания не связан с наличием тока в плазме, и потому он может работать в стационарном режиме. Кроме того, винтовая обмотка может оказывать «диверторное» действие, т.е. очищать плазму от примесей и удалять продукты реакции.

4.4 Открытая ловушка

Открытые ловушки - разновидность магнитных ловушек для удержания термоядерной плазмы в определённом объёме пространства, ограниченном в направлении вдоль поля. В отличие от замкнутых ловушек (токамаков, стеллараторов), имеющих форму тороида, для открытых ловушек характерна линейная геометрия, причём силовые линии магнитного поля пересекают торцевые поверхности плазмы (с этим связано происхождение термина "открытая ловушка" - она "открыта" с торцов).

В установке типа открытой ловушки (пробкотрон) в цилиндрическую вакуумную камеру, запёртую магнитными пробками, точно выбрав направление, впрыскивают атомы, которые тормозятся в водородном газе и превращают его в горячую плазму. Удерживают ее магнитные поля сложной конфигурации.

Открытые ловушки обладают рядом преимуществ по отношению к другим системам удержания: они привлекательны с инженерной точки зрения; в них эффективно используется удерживающее плазму магнитное поле; они допускают работу в стационарном режиме; в них относительно просто решается проблема удаления из плазмы продуктов термоядерной реакции и тяжелых примесей. Недостаток: слишком большая скорость потерь плазмы вдоль силовых линий магнитного поля.

4.5 Плазменный фокус

Плазменный фокус - нестационарный сгусток плотной высокотемпературной дейтериевой плазмы, являющийся локализов. источником нейтронов и жёстких излучений; так же называют и электроразрядную установку, в которой получается эта плазма. Плазменный фокус относится к разряду пинчей; образуется в области кумуляции токовой оболочки на оси газоразрядной камеры, вследствие чего, в отличие от z-пинча, приобретает нецилиндрическую (обычно воронкообразную) форму. Благодаря этому удаётся резко повысить плотность энергии в плазме (эффект фокусировки) и стимулировать ряд процессов, приводящих к генерации мощных импульсов жёстких излучений

В вакуумной камере между двумя электродами создается мощный импульс тока, который быстро нагревает плазму и дает всплеск ядерного синтеза. Плазма связана с магнитным полем, но синтез идет в импульсах микросекундной длительности.

4.6 Галатея

Галатея – магнитные ловушки, в которых магнитное поле создается не только внешними (по отношению к плазме) катушками, а и погруженными в плазму проводниками с током. Преимущество: отсутствие неустойчивостей, связанных с диамагнетизмом плазмы. В таких “магнитных баллонах” плазма располагается в области очень малого магнитного поля, что позволяет использовать их в малорадиоактивном термоядерном реакторе на D-³He-топливе.

Традиционные магнитные ловушки, перечисленные выше, имеют одно общее свойство: плазма и магнитное поле в них "перемешаны". Это приводит к нескольким неприятным явлениям, одно из которых -

неустойчивость плазменного шнура. Заряженные частицы плазмы движутся в поле по спиральям, образуя круговые токи. Собственные магнитные поля токов направлены противоположно полям внешним, и при их взаимодействии возникает сила, выталкивающая плазму из поля. В устройствах, называемых галатеями, магнитное поле образует своего рода "корку", или "забор", который отбрасывает вылетающую частицу внутрь плазменного шнура. Для этого внутри плазменного объема нужно подвесить сверхпроводящие кольца, по которым циркулирует электрический ток.



Рис. 12. Схема аппаратуры для лазерного термояда.

5. УСТАНОВКИ ИНЕРЦИОННОГО СИНТЕЗА

Инерциальный управляемый термоядерный синтез - один из видов ядерного синтеза, при котором термоядерное топливо удерживается собственными силами инерции. Идея заключается в быстром и равномерном нагреве термоядерного топлива, так чтобы образовавшаяся плазма до разлёта успела прореагировать. При использовании данного принципа реактор будет импульсным. Для D-T плазмы сжатой в 100 раз с температурой 10^8 К и диаметром в 2 мм, время удержания соответствует 10^{-9} секунды, что создаёт значительную проблему мгновенности разогрева. Поэтому для разогрева используют различные высокомоощные лазеры, в том числе лазеры сверхкоротких импульсов. Для увеличения плотности и времени удержания используется радиационная импlosion мишени, и прочие вторичные эффекты.

В импульсных системах с инерционным удержанием плазмы, выполнение критерия Лоусона достигается не за счёт длительного удержания плазмы, а за счёт увеличения её плотности в результате сжатия смеси. Если при сжатии удастся достичь требуемой температуры 10-50 КэВ, а плотность смеси после её сжатия будет достаточно велика, то она успеет прореагировать за время инерционного разлета смеси. Такие системы, которые фактически используют микровзрывы небольшого количества реагирующей смеси, называются системами с инерционным удержанием. Основная физическая задача в этом направлении управляемого термоядерного синтеза - получение высоких степеней сжатия в таком малом количестве топлива, которое позволит использовать выделившуюся термоядерную энергию без разрушения камеры.

В инерционном термоядерном синтезе несколько миллиграмм дейтериево-тритиевой смеси сжимаются оболочкой, ускоряемой за счет реактивных сил, возникающих при испарении оболочки с помощью мощного лазерного или рентгеновского излучения. Энергия выделяется в виде микровзрыва, когда в процессе сжатия в смеси дейтерия с тритием достигаются необходимые условия для термоядерного горения. Время жизни такой плазмы определяется инерционным разлетом смеси и поэтому критерий Лоусона для инерционного удержания принято записывать в терминах произведения ρr , где ρ - плотность реагирующей смеси и r - радиус сжатой мишени. Для того, чтобы за время разлета смесь успела выгореть, нужно, чтобы $\rho r \sim 3$ г/см². Отсюда следует, что критическая масса топлива, M , уменьшается с ростом плотности смеси, $M \sim 1/r^2$, а следовательно и энергия микровзрыва будет тем меньше, чем большей плотности смеси удастся достичь при сжатии.



Рис. 13. Взрывная камера создаваемой в России установки инерционного термоядерного синтеза «ИСКРА-6». Со всех сторон в камеру будет вводиться 128 лучей, генерируемых фиолетовым лазером на стекле с неодимом. Импульс длительностью 3 нс будет нести энергию 300 кДж, длина волны лазера - 350 нм. На сегодня уже построены и используются в экспериментах четыре лазерных канала (установка «Луч») с энергией в импульсе 12 кДж.

Ограничения на степень сжатия связаны с небольшой, но всегда существующей неоднородностью падающего на оболочку излучения и с несимметрией самой мишени, которая еще и нарастает в процессе сжатия из-за развития неустойчивостей. В результате появляется некая критическая масса мишени и, следовательно, критическая энергия, которую нужно вложить оболочку для ее разгона и получения положительного выхода энергии. В мишень с массой топлива около 5 мг и радиусом 1-2 мм нужно вложить 2 МДж за время $5-10 \times 10^{-9}$ с. При этом энергия микровзрыва будет на уровне всего 5×10^8 Дж (эквивалентно около 100 кг обычной взрывчатки) и может быть легко удержана достаточно прочной камерой. Предполагается, что будущий термоядерный реактор будет работать в режиме последовательных микровзрывов с частотой в несколько герц, а выделяемая в камере энергия будет сниматься теплоносителем и использоваться для получения электроэнергии.

Многослойные мишени уже проверены с помощью подземных ядерных взрывов, которые позволяют обеспечить требуемую мощность излучения. Было получены зажигание и большой положительный выход термоядерной энергии, и поэтому нет сомнений, что этот способ может привести к успеху. Основная техническая проблема - создание эффективного импульсного драйвера для ускорения оболочки. Требуемые мощности можно получить, используя лазеры, но к.п.д лазеров слишком мал для того, чтобы можно было рассчитывать на положительный выход энергии. В настоящее время разрабатываются и другие драйверы для инерционного синтеза основанные на использовании ионных и электронных пучков, и на создании рентгеновского Лазерное зажигание

Чтобы микровзрыв произошел, надо успеть за миллиардные доли секунды нагреть топливный шарик до термоядерной температуры. Сделать это можно с помощью мощных лазеров. Недавно в США заработала мощная лазерная установка NIF с энергией импульса до 1,8 миллиона джоулей. Лазерные лучи со всех сторон направляют на мишень, содержащую термоядерное топливо. Это смесь дейтерия с тритием, охлажденная ниже температуры плавления водорода, т. е. до 10К (-263°C). Под действием светового давления и реактивной силы от испаряющегося с поверхности вещества происходит одновременно сильное сжатие и нагрев мишени. Если достичь плотности в 1000 раз выше плотности твердого водорода, то одного миллиона джоулей будет достаточно для поджига термоядерной реакции. Но пока в экспериментальных установках плотность возрастает лишь в 30-40 раз. Основное препятствие — недостаточная равномерность освещения мишени. Даже небольшие (в несколько процентов) различия скорости сжатия по разным направлениям приводят к деформации мишени, и плазма буквально просачивается между лазерными пучками.



Рис. 14. Лазерная установка УТС с отражателями.

Для более равномерного сжатия в последнее время стали применять схему непрямого облучения мишени. Твердый дейтерий-тритиевый шарик помещают в оболочку из материала с большим зарядом ядра, например урана или золота. Лазерные лучи вводят в нее через два окна так, чтобы не задев мишень, осветить внутреннюю поверхность оболочки. Она сразу превращается в слой горячей плазмы, испускающий мощное рентгеновское излучение, которое намного равномернее освещает мишень, вызывая её сжатие. Ожидается, что таким способом удастся достичь сжатия мишени в 4000 раз и получить в 100-200 раз больше термоядерной энергии, чем содержалось в лазерном импульсе. Впрочем, и этого мало: КПД лазера составляет около 2%, а значит, чистый выигрыш в энергии будет всего несколько раз. Возможно, ситуация улучшится, если разделить задачи сжатия и нагрева вещества: для поджига мишени, предварительно сжатой обычными лазерами, можно использовать появившиеся в последнее время лазеры с очень коротким импульсом - 10^{-11} сек.

Еще одна проблема инерционного термоядерного синтеза - необходимость взрывать заряды несколько раз в секунду. Пока столь мощные лазеры дают по одному импульсу в несколько часов. Есть идея заменить их ускорителями ионов: у них значительно выше КПД, и они могут работать с высокой частотой. Но из-за электрического отталкивания ионов пучок трудно сфокусировать до нужного диаметра.

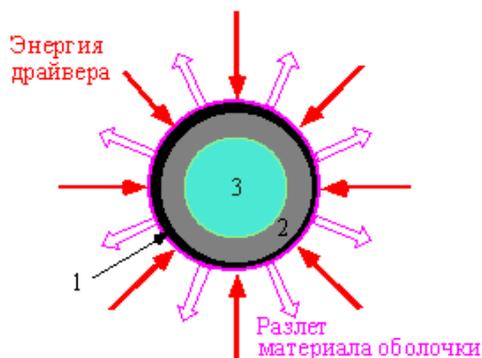


Рис. 15. Мишень для инерционного синтеза: полая оболочка (1), слой твердой замороженной DT смеси (2) и DT газа низкой плотности в центре мишени (3).

Одна из возможных схем мишени показана на **Рис. 15**. Основное топливо содержится внутри мишени в виде твердой DT смеси, замороженной на внутреннюю сторону оболочки мишени. Центральная часть мишени заполнена разреженным DT газом (примерно 5 % от полной массы топлива), который служит для поджига мишени в процессе ее сжатия. Испарение материала оболочки мишени и его разлет создает реактивную, силу, сжимающую оболочку и содержащиеся в нем DT топливо. В конечном, сжатом состоянии давление должно быть примерно однородным по сечению, но температура в центральной области, получившейся из разреженного газа (область 3 на **Рис. 15**), будет более высокой, поэтому, в центре загорится термоядерная реакция, которая будет разогревать более плотную внешнюю область. В результате, термоядерное горение распространится на всю смесь, содержащуюся внутри оболочки. После этого, смесь будет разлетаться, примерно, со скоростью звука, соответствующей температуре смеси, $T = 20 \div 40$ КэВ.

Расчёты показали, что для поджига мишени миллиметрового размера, содержащей несколько миллиграмм DT смеси, к ней требуется подвести полную энергию на уровне нескольких МДж за время меньшее или порядка 10 наносекунд. Отклонения от симметрии облучения мишени должно быть не более 1%. В термоядерном реакторе с электрической мощностью 1 ГВт нужно поджигать 5÷6 мишеней в секунду.

Помимо лазеров существуют и другие мощные драйверы - ионные и электронные пучки, которые также могли бы обеспечивать требуемые мощности на поверхности мишеней. Были разработаны импульсные системы питания, способные создавать и подводить к мишеням энергию 1-10 МДж за 10^{-8} с, т.е., получать пиковые мощности на уровне 10^{15} Вт.

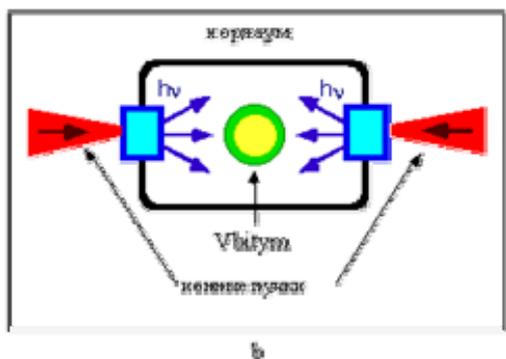
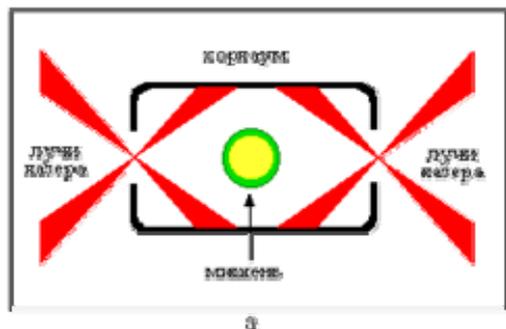


Рис. 16. Схема облучения мишени в холрауме для лазерного излучения (а) и пучков тяжелых ионов (б). Испускание стенками мягкого рентгена

Рассмотрим теперь, каким образом в эксперименте добиваются требуемой равномерности облучения. Существуют два принципиальных подхода. При прямой схеме облучения, которая используется в случае оптических драйверов, однородность достигается за счет использования большого количества лучей, равномерно распределенных по поверхности мишени. При этом используются различные дополнительные оптические методы, позволяющие более равномерно "размазать" излучение отдельного пучка по поверхности мишени. Второй подход, который можно использовать не только для оптических, но и пучковых драйверов, заключается в использовании холраума - дополнительной камеры с

небольшими отверстиями, которая изготовлена из материалов с большим Z , например таких, как вольфрам (Рис. 16).

Непрямая схема облучения позволяет преобразовывать лазерное излучение в излучение с меньшей длиной волны (мягкое рентгеновское излучение), которое обеспечивает лучшие характеристики сжатия мишени, чем исходное излучение. Кроме того, достигается большая равномерность облучения мишени. Несмотря на наличие "посредника" в этой схеме, эффективность преобразования лазерного излучения в рентгеновское достигает в экспериментах 40-80 %. Схема с холраумом является основной схемой сжатия при использовании ионных пучков, которые имеют большой пробег в веществе и следовательно не могут быть использованы для прямого облучения мишени.

Можно использовать два типа ионных пучков: пучки легких ионов, типа Li, с энергией в несколько десятков МэВ и пучки тяжелых ионов, типа Pb, с энергией до 10 ГэВ. Если говорить о реакторных приложениях, то в обоих случаях нужно подвести к мишени радиусом несколько миллиметров энергию в несколько МДж за время порядка 10 нс. Необходимо не только сфокусировать пучок, но и суметь провести его в камере реактора на расстояние порядка нескольких метров от выхода ускорителя до мишени, что для пучков частиц является совсем не простой задачей.

Пучки легких ионов с энергией несколько десятков МэВ можно создавать с относительно большим к.п.д. с помощью импульсного напряжения, приложенного к диоду. Современная импульсная техника позволяет получать мощности, требуемые для обжатия мишеней, и поэтому, пучки легких ионов являются наиболее дешевым кандидатом для драйвера. Так, установка RBFA-11 (США) позволяет создавать короткие (15 нс) импульсы 30 МэВ-ных ионов Li с пиковым током 3.5 МА и полной энергией около 1 МДж. Кожух из материала с большим Z с мишенью внутри помещается в центре сферически симметричного диода, позволяющего получать большое количество радиально направленных ионных пучков. Энергия ионов поглощается в кожухе холраума и пористом наполнителе между мишенью и кожухом и преобразовывается в мягкое рентгеновское излучение, сжимающее мишень. В реакторе, использующем лёгкие ионы в качестве драйвера, требуются колоссальные потоки быстрых частиц с высокой плотностью частиц вблизи мишени. Фокусировка таких пучков на миллиметровые мишени представляет собой задачу огромной сложности. Кроме того, лёгкие ионы будут заметно тормозиться в остаточном газе в камере сгорания.

Переход к тяжелым ионам и большим энергиям частиц позволяет существенно смягчить эти проблемы и, в частности, уменьшить плотности тока частиц и, таким образом, облегчить проблему фокусировки частиц. Однако, для получения требуемых 10 ГэВ-ных частиц требуются огромные ускорители с накопителями частиц и прочей сложной ускорительной техникой. Положим, что полная энергия пучка 3 МДж, время импульса 10 нс и область, на которую должен быть сфокусирован пучок, представляет собой окружность с

радиусом 3 мм. Сравнительные параметры гипотетических драйверов для обжатия мишени приведены в **Табл. 2**.

Табл. 2. Сравнительные характеристики драйверов на лёгких и тяжёлых ионах.

Тип драйвера	Ионы	Энергия ионов	Скорость частиц	Ток ионов	Плотность частиц *)
Лёгкие ионы	Li	30 МэВ	$3 \cdot 10^7$ м/с	10 МА	$6 \cdot 10^{20}$ м ⁻³
Тяжёлые ионы	Pb	10 ГэВ	10^8 м/с	30 кА	10^{17} м ⁻³

*) – в области мишени.

Пучки тяжёлых ионов, также, как и лёгкие ионы, требуют использования холпраума, в котором энергия ионов преобразуется в рентгеновское излучение, равномерно облучающее саму мишень. Конструкция холпраума для пучка тяжёлых ионов лишь немного отличается от холпраума для лазерного излучения. Отличие заключается в том, что пучки на требуют отверстий, через которое лазерные лучи проникают внутрь холпраума. Поэтому, в случае пучков, используются специальные поглотители частиц, которые преобразуют их энергию в рентгеновское излучение. Один из возможных вариантов показан на **Рис. 16b**. Оказывается, что эффективность преобразования уменьшается с ростом энергии ионов и ростом размера области, на которой происходит фокусировка пучка. Поэтому, увеличение энергии частиц свыше 10 ГэВ нецелесообразно.

Пока ускорителей тяжёлых ядер, требуемых для инерционного синтеза, не существует. Основная трудность их создания связана с необходимостью увеличивать плотности потоков частиц до такого уровня, при котором пространственная плотность заряда ионов уже существенно влияет на динамику и фокусировку частиц. Для того, чтобы уменьшить эффект пространственного заряда, создают большое количество параллельных пучков, которые будут соединяться в камере реактора и направляться на мишень. Характерный размер линейного ускорителя - несколько километров.

Одна из возможных схем заключается в самофокусировке пучков, которая может происходить в газе низкого давления. Пучок будет вызывать ионизацию газа и компенсирующий встречный электрический ток, протекающий по плазме. Азимутальное магнитное поле, которое создается результирующим током (разницей тока пучка и обратного тока плазмы), будет приводить к радиальному сжатию пучка и его фокусировке. Такая схема возможна, если давление газа будет поддерживаться в нужном диапазоне 1-100 Торр.

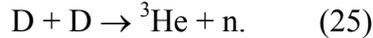
Хотя пучки тяжёлых ионов открывают перспективу создания эффективного драйвера для термоядерного реактора, они имеют перед собой колоссальные технические трудности, которые еще предстоит преодолеть, прежде, чем цель будет достигнута. Для термоядерных приложений нужен ускоритель, который будет создавать пучок 10 ГэВ-ных ионов с пиковым током в несколько десятков КА и со средней мощностью около 15 МВт. Объём магнитной системы такого ускорителя сравним с объемом магнитной системы токамака и, поэтому их стоимости одного порядка.

В отличие от магнитного термоядерного реактора, где требуется высокий вакуум и чистота плазмы, в камере импульсного реактора такие требования не предъявляются. Основные технологические трудности создания импульсных реакторов лежат в области драйверной техники, создании прецизионных мишеней и систем позволяющих подавать и контролировать положение мишени в камере. Сама камера импульсного реактора имеет относительно простую конструкцию. Большинство проектов предполагает использовать жидкую стенку создаваемую открытым теплоносителем. Например, проект реактора NYLIFE-11 использует расплавленную соль Li_2BeF_4 , жидкая завеса из которой окружает область, куда поступают мишени. Жидкая стенка поглощает нейтронное излучение и смывает остатки мишеней. Она же демпфирует давление микровзрывов и равномерно передает её на основную стенку камеры. Характерный внешний диаметр камеры 8 м, её высота - 20 м. Полный расход жидкого теплоносителя составляет 50 м³/с. Предполагается, что кроме основного, стационарного потока, в камере будет сделана импульсная жидкая заслонка, которая будет открываться синхронизировано с подачей мишени с частотой около 5 Гц для пропускания пучка тяжелых ионов.

Требуемая точность подачи мишени составляет доли миллиметров. Очевидно, что пассивная подача мишени на расстояние в несколько метров с такой точностью в камере, в которой будет происходить турбулентные потоки газа, вызванные взрывами предшествующих мишеней, представляет собой практически невыполнимую задачу. Поэтому, в реакторе потребуются система управления, позволяющая отслеживать положение мишени и производить динамическую фокусировку пучка. В принципе, такая задача выполнима, но может существенно усложнить управление реактором.

Определённые перспективы в УТС имеет использование рентгеновских лучей. При сдавливании электрическим разрядом (Z-пинч) вольфрамовых проволок, окружающих дейтериевую мишень, проволоки

испаряются, создавая мощный рентгеновский импульс, который сжимает и нагревает мишень. дейтериевой плазмы, где проходит реакция:



Использование рентгеновской установки вместо дорогого лазера возможно приведет к удешевлению термоядерной энергии, повысив её конкурентную способность. Отказ от DT-топлива снимет сложную проблему наработки трития. А это не только экономическая выгода, но и важный экологический стимул.

Рассмотрим теперь перспективы взрывной дейтериевой энергетики.

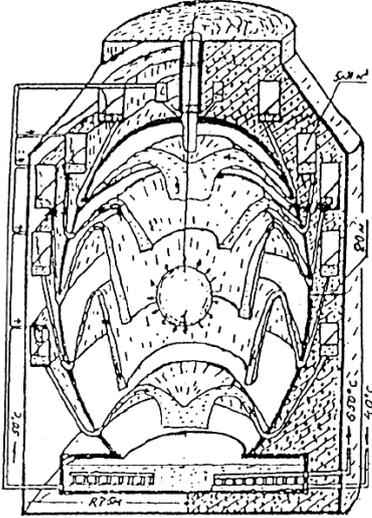


Рис. 17. Схема реактора КВС (взрывная дейтериевая энергетика)

Предложен метод получения ядерной энергии путём взрывов атомных зарядов, инициирующих DD-реакцию. Согласно ему предлагается производить в камере КВС (котел вспышечного сгорания) термоядерные взрывы большой мощности (а не микровзрывы, как в инерциальном термояде) с целью получения энергии.

Энергетическая выгода заключается в том, что выделяемая в DD реакции энергия идёт на производство электричества, а нейтроны регенерируют ${}^{239}\text{Pu}$ из ${}^{238}\text{U}$, как это делается в реакторах на быстрых нейтронах. Предлагаемая мощность зарядов 10 килотонн в тротиловом эквиваленте, что в 10^5 раз больше мощности микровзрывов лазерных мишеней!

Такой взрыв может выдержать КВС очень большого размера диаметр 120 м, высота 250 м, камера из железобетона со стенками толщиной 25 м, наполненная разреженным аргоном (Рис. 17). Для смягчения ударной волны за секунды до взрыва перед стенками создается защитный занавес из жидкого натрия, одновременно используемого как теплоноситель первого контура и как аккумулятор наработанного ядерного топлива. Установка размещается под землей в скальном грунте. Дополнительное преимущество предлагаемого метода в том, что решается проблема оружейного плутония: накопленного плутония хватит для обеспечения мировой энергетики на тысячу лет.

Проблема реализации КВС в том, что все атомные взрывы, даже подземные, сейчас запрещены.

Для полноты картины упомянем идею холодного термоядерного синтеза (мюонного катализа). Этому варианту УТС не нужны горячая плазма, микро- и макровзрывы, вообще какой-либо разогрев. Суть его заключается в использовании нестабильной частицы - отрицательно заряженного мюона, масса которого в 200 раз больше массы электрона. Мюон по своим свойствам очень похож на электрон, в частности, он может замещать электрон в атоме, но, по закону квантования, радиус мюонной орбиты в 200 раз меньше, чем электронной. Атомы дейтерия и трития, в которых место электрона занял мюон, могут объединяться в молекулы, где ядра дейтерия и трития сближены в 200 раз, до расстояния около 10^{-11} см, что всё ещё намного больше радиуса ядерных сил (10^{-13} см). В горячей плазме при таком сближении ядерная реакция не пойдет, т.к. встреча ядер длится мгновение, после чего они разлетаются. Но в мезомолекуле дейтерий и тритий постоянно находятся на таком расстоянии и могут, «почувствовав» друг друга, с заметной вероятностью осуществить туннельный переход, вступив в DT-реакцию. Образуются ядро гелия и нейтрон, выделится энергия синтеза, а мюон, ставший вновь свободным, может сесть на орбиту соседнего атома, заменив в нем электрон. Все повторится - произойдет новое сближение ядер и новая реакция синтеза. Отрицательный мюон выступает здесь в роли активного посредника, сводящего вместе дейтерий и тритий. Он - ядерный катализатор. Оказывается, за время своей короткой жизни (2 мкс) мюон успевает осуществить до ста DT-реакций.

Способ нуждается в интенсивных потоках мюонов, получаемых на ускорителях во взаимодействии энергичных протонов с ядрами, и, как в любом методе, необходимо условие положительного выхода энергии. Сейчас идет борьба за энергетическую цену одного мюона, и если она окажется меньше суммарного выхода реакций синтеза, мю-катализ будет включен в реестр конкурирующих путей УТС.

6. ВОДОРОДНАЯ БОМБА

Термоядерное оружие использует синтез лёгких элементов, для которого не существует понятия критическая масса и, следовательно, нет тех трудностей, которые осложняют создание атомной бомбы. Кроме того, при синтезе дейтерия и трития выделяется в 4,2 раза больше энергии, чем при делении ядер такой же массы урана-235. Водородная бомба – гораздо более мощное оружие, чем атомная бомба.

В водородной бомбе можно использовать следующие термоядерных реакции:

- (1) $D + T \rightarrow He^4 + n + 17.588 \text{ МэВ}$ (26a)
 (2) $D + D \rightarrow He^3 + n + 3.268 \text{ МэВ}$ (26б)
 (3) $D + D \rightarrow T + p + 4.03 \text{ МэВ}$ (26в)
 (4) $He-3 + D \rightarrow He^4 + p + 18.34 \text{ МэВ}$ (26г)
 (5) $Li-6 + n \rightarrow T + He^4 + 4.78 \text{ МэВ}$ (26д)
 (6) $Li-7 + n \rightarrow T + He^4 + n - 2.47 \text{ МэВ}$ (26е)

При температурах, достигаемых в атомных бомбах, реакция (1) проходит в 100 раз быстрее, чем следующие (реакции 2 и 3 вместе взятые). Это объясняет очень сильное желание использовать тритий в первых термоядерных экспериментах. Реакции (2) и (3), в свою очередь, в 10 раз быстрее реакции (4). При этом скорость всех этих процессов (1-4) экспоненциально растет с температурой. При повышении температуры, в ходе набирающего обороты синтеза, скорость реакции (4) превышает скорость реакций (2)+(3) вместе взятых. Реакции (5) и (6) строго говоря не являются термоядерными. Это обычные реакции деления, происходящие при захвате литием нейтрона в нужном энергетическом диапазоне. Зато в их ходе выделяется очень ценный тритий, который не останется без дела. Реакция ${}^6Li+n$ требует нейтрона с энергией несколько МэВ, ${}^7Li+n$ - нейтрона не менее 4 МэВ. Используя легкую для поджога, но чрезвычайно дорогую дейтериево-тритиевую смесь, возможно инициировать заметную реакцию даже при обычной плотности термоядерного горючего, используя лишь тепло от атомного взрыва (50-100 млн. градусов). Правда изотоп водорода H^3 - тритий - дорог в производстве (на порядок дороже оружейного плутония), да и к тому же радиоактивен. Это делает его непригодным к использованию. Остается H^2 - дейтерий - вполне доступное горючие для реакций (2), (3). Его недостаток - дейтерий должен был быть очень сильно сжат или сжижен при криогенной температуре - непрактично. Проблема решается путем комбинирования дейтерия с литием в химическое соединение - дейтерид лития. При этом за счет деления лития производится большое количество трития для реакции (1). Все сложности с реакциями синтеза упираются в необходимость обеспечения высокой скорости протекания реакции (т.е. высокой температуры) и достаточного времени реакции.

Одна из первых и самая ясная идея построения термоядерного заряда заключается в простом окружении ядра делящейся атомной бомбы слоем термоядерного горючего. Излучение от атомного взрыва способно сжать 7-16 слоев горючего, перемежающегося со слоями делящегося материала и нагреть его примерно до такой же температуры, как и само делящееся ядро. Быстрые нейтроны, рожденные при реакциях в слоях термоядерного горючего, должны были вызвать деления в соседних слоях делящихся материалов, что должно было приводить к заметному увеличению энерговыделения. В результате ионизационного сжатия термоядерного горючего в процессе взрыва должна была сильно увеличиться его плотность и резко возрасти скорость термоядерных реакций. Расчеты показывают, что при температурах атомного взрыва может начаться только одна реакция - дейтерия с тритием:



это требовало бы использования очень дорогого и столь же неудобного трития.

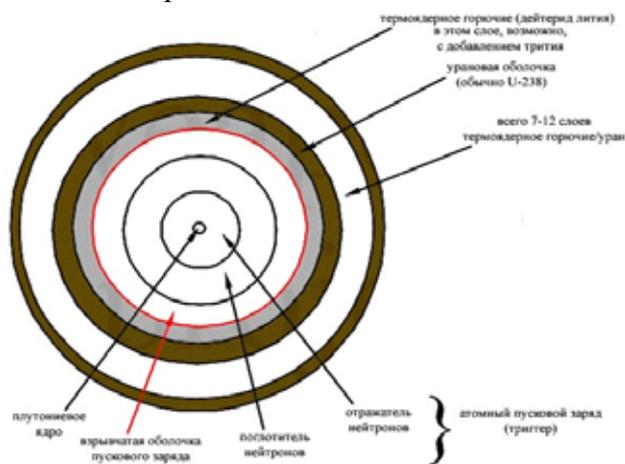
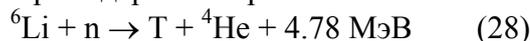


Рис. 18. Термоядерный заряд ограниченного потенциала (слойка).

В 1947 Теллер предложил использовать новое термоядерное горючее - дейтерид лития-6. Это должно было привести к значительному увеличению производства трития в процессе самой реакции и тем самым заметно увеличить эффективность термоядерного горения



требовался по меньшей мере 12-см слой дейтерида, чтобы полностью утилизировать все поступающие от первичного заряда нейтроны. Реакция распада лития, кроме производства трития, еще больше повышала температуру, помогая начаться синтезу. Захват всех нейтронов создаст выделение энергии примерно в 2.5% от мощности триггера. И все это тепло поступит непосредственно в горючее. Урановые оболочки, окружающие термоядерное топливо, первоначально выполняют роль теплоизоляторов, не давая энергии выйти за пределы капсулы с топливом. Без них горючее, состоящее из лёгких элементов и поэтому полностью ионизированное, было бы абсолютно прозрачно для теплового излучения, и не прогрелось бы до высоких температур. Непрозрачный уран, поглощая эту энергию, возвращает часть ее обратно в топливо. Кроме того, урановые оболочки увеличивают сжатие горючего путем

сдерживания его теплового расширения. На втором этапе, уран подвергается распаду за счёт нейтронов, появившихся при синтезе. Это настолько усиливает энергетический выход, что схема становится более-менее актуальной для реализации. Энерговыведение может быть повышено за счёт увеличения толщины дейтерида и урана. В этом случае достаточно вторичных нейтронов поставляется делением уранового корпуса обратно в слой дейтерида лития, рождая второе поколение атомов трития. Таким образом, устанавливается сложная цепная реакция: распад урана в оболочке → рождение трития → синтез → реакция распада в уране оболочки. Процесс прекращается тогда, когда увеличившаяся в размерах оболочка начнет терять слишком много нейтронов. Преимущество "однократной" схемы состоит в небольшой массе готового изделия. Недостаток - в использовании в ней большого количества дорогих материалов. В конструкцию можно ввести изначально небольшое количество трития, тогда некоторые нейтроны не расходуются на его образование (ведь он уже есть), а непосредственно делят ^{238}U оболочки. Создается увеличение выхода заряда - ведь теперь появились "свободные" нейтроны - родившиеся при реакции *изначальный* тритий + дейтерий. Идея "слойки", пришла на ум сначала Теллеру, потом в 1948 А. Д. Сахарову, затем британским ученым. Но будучи тупиковой ветвью развития термоядерных систем отмерла.

Схема радиационной имплозии Улама-Теллера использует тот факт, что при обычном атомном взрыве 80% энергии выделяется в виде мягких рентгеновских лучей, а не в виде осколков деления. Естественно, рентгеновские лучи намного опережают расширяющиеся (со скоростью 1000 км/с) остатки плутония. Это позволяет использовать их для сжатия и поджога отдельной емкости с термоядерным горючим (второй ступени), путем обжатия излучением, до того, как расширяющийся первичный заряд разрушит её.



Рис. 19. Схема Улама-Теллера.

По этой схеме компоненты бомбы помещаются в цилиндрический корпус с пусковым атомным зарядом ("триггером") на одном конце. Термоядерное топливо в виде цилиндра или эллипсоида помещается в корпус-толкатель - слой очень плотного материала - урана/вольфрама. Внутри цилиндра аксиально помещен стержень из ^{239}Pu или ^{235}U , 2-3 см в диаметре. Все оставшееся пространство корпуса заполняется пластмассой. Триггер от цилиндра с горючим отделен защитной крышкой из урана или вольфрама. После взрыва пускового заряда рентгеновские лучи, испускаемые из области реакции деления, распространяются по пластмассовому наполнителю. Основные составляющие пластмассы - атомы углерода и водорода, которые полностью ионизируются и становятся совершенно прозрачными для рентгена. Урановый экран между триггером и капсулой с горючим, а так же сам корпус капсулы предотвращают преждевременный нагрев дейтерида лития.

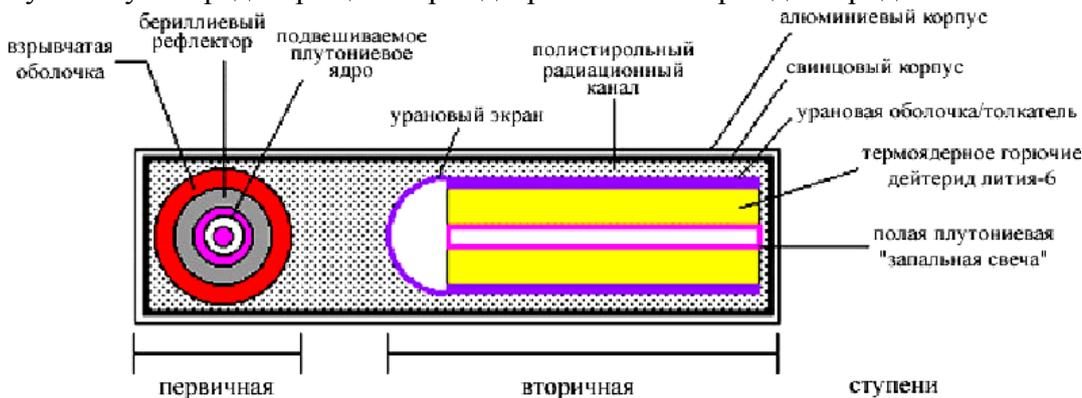


Рис. 20. Двухэтапная схема радиационной эксплозии.

Тепловое равновесие устанавливается чрезвычайно быстро, так что температура и плотность энергии сохраняются постоянными на всем пути распространения излучения. Когда урановый корпус бомбы нагревается, то начинает расширяться и охлаждаться путем уноса массы (абляции). Явление уноса, подобно огненной струи ракетного двигателя направленного внутрь капсулы, развивает огромное давление на термоядерное горючие, вызывая прогрессирующее его обжатие. Установившееся тепловое равновесие обеспечивает равномерность распределения давления со всех сторон.

Абляция - унос массы с поверхности твёрдого тела потоком горячих газов, обтекающим эту поверхность. Происходит в результате эрозии, расплавления, сублимации. Наблюдается, например, при движении в атмосфере с большими скоростями метеорных тел и космических летательных аппаратов.

После срабатывания первичного заряда "корпус" капсулы представляет собой многократно ионизированную плазму. Прозрачная углеродно-водородная плазма тормозит раннее расширение плазмы корпусов капсулы и всей бомбы, сохраняя канал для распространения рентгеновского излучения от перекрытия его тяжелыми атомами корпусов. Сила, сжимающая и ускоряющая термоядерное горючие, развивается исключительно благодаря **абляции**. Два остальных возможных источника давления - давление плазмы (давление, развиваемое тепловым движением плазмы между корпусами) и давление рентгеновских фотонов - не оказывают непосредственного влияния на обжатие. Оказываемое на капсулу (состоящую из уранового корпуса, горючего и стержня из делящегося материала) давление приводит к цилиндрической имплозии, уменьшая ее диаметр примерно в 30 раз. Плотность материала капсулы возрастает в 1000 раз. Находящийся в центре капсулы плутониевый стержень воспринимает очень сильное ударное воздействие и разогревается до высокой температуры, при этом сжимаясь в ~4 раза. Однако этого хватает для приведения его в надкритическое состояние. Быстрые нейтроны, в избытке имеющиеся при делении триггера, замедляются дейтеридом лития до тепловых скоростей и начинают цепную реакцию в стержне так скоро, как быстро он переходит в сверхкритическое состояние. Его взрыв вызывает еще большее увеличение давления и температуры в центре капсулы, делая их достаточными для разжигания термоядерной реакции. Далее, самоподдерживающаяся реакция горения двигается к внешним областям капсулы с топливом. Корпус капсулы мешает выходу теплового излучения за ее пределы, значительно увеличивая эффективность горения.

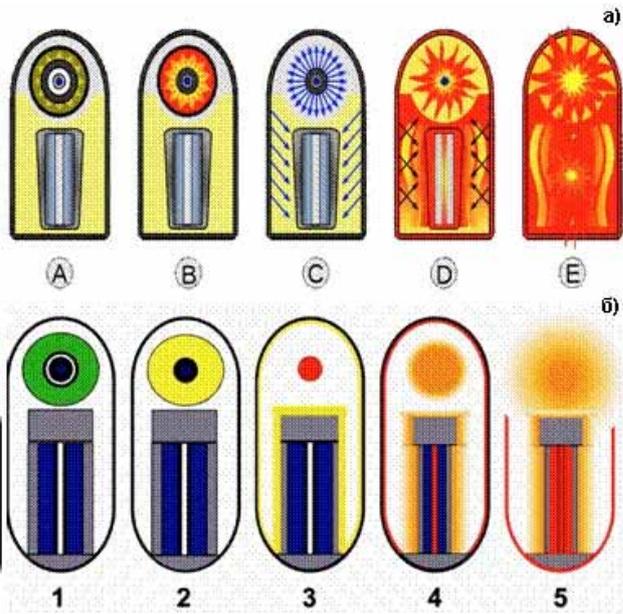


Рис. 21. Развитие процессов при взрыве атомного заряда
 а) Развитие плазмы
 б) Последовательность абляции.

Температуры, возникающие в ходе термоядерной реакции многократно превышают образующиеся при цепном делении (до 300 миллионов К). С ростом температуры растет и скорость прохождения реакций. Все это происходит всего за несколько сотен наносекунд. Для срабатывания этой схемы крайне важны условия симметрии заряда и точного соблюдения условий эффективной лучевой имплозии. Бор-10, служащий хорошим поглотителем нейтронов и снижающим эффект предварительного разогрева термоядерного топлива. Двухступенчатая схема Теллера-Улама позволяет создавать столь мощные заряды, на сколько хватит мощности триггера для сверхбыстрого обжатия большого количества горючего. Для дальнейшего увеличения величины заряда можно использовать энергию второй ступени для сжатия третьей. Вообще, на каждой стадии в таких устройствах возможно усиление мощности в 10-100 раз.

Двухступенчатая схема Теллера-Улама позволяет создавать столь мощные заряды, на сколько хватит мощности триггера для сверхбыстрого обжатия большого количества горючего. Для дальнейшего увеличения величины заряда можно использовать энергию второй ступени для сжатия третьей. Вообще, на каждой стадии в таких устройствах возможно усиление мощности в 10-100 раз.

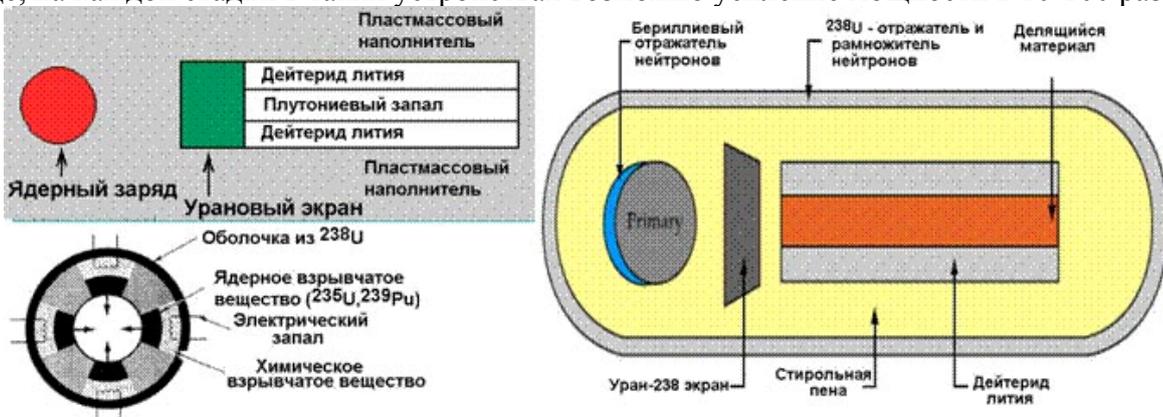


Рис. 22. Компоненты водородной бомбы.



Рис. 23. Первая водородная бомба СССР.

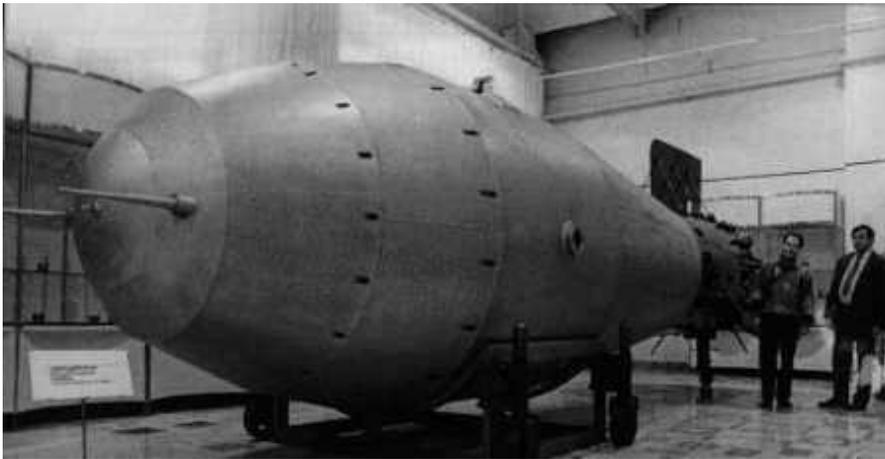


Рис. 24. Созданная в СССР самая мощная в мире водородная бомба («Кузькина мать», 50 мегатонн т.э.).